



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRMEDE
MİKRODALGA ENERJİSİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Mad.Yük.Müh. M.Faruk ESKİBALCI

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Danışman

Doç.Dr. Şafak G. ÖZKAN

Eylül, 2007

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRMEDE
MİKRODALGA ENERJİSİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Mad.Yük.Müh. M.Faruk ESKİBALCI

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Danışman

Doç.Dr. Şafak G. ÖZKAN

Eylül, 2007

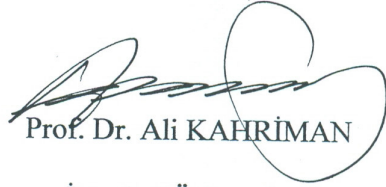
İSTANBUL

Bu çalışma 18 /09/ 2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından MADEN MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı MADEN MÜHENDİSLİĞİ programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

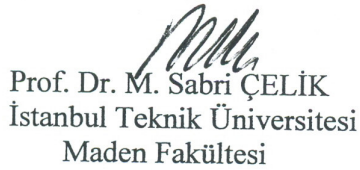
Tez Jürisi



Doç. Dr. Şafak G. ÖZKAN
(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Ali KAHRİMAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. M. Sabri ÇELİK
İstanbul Teknik Üniversitesi
Maden Fakültesi



Prof. Dr. A. Ali SİRKECİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
Maden Fakültesi



Doç. Dr. Ataç BAŞÇETİN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin
T-576/17032005 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Doktora öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek, öneri ve yönlendirmelerinden dolayı değerli tez danışman hocam Sayın Doç.Dr.Şafak G. ÖZKAN'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Yine çalışmalarım sırasında değerli öneri ve yönlendirmeleri ile laboratuvar imkanlarını bana açan tez izleme komitesi üyesi değerli hocam Sayın Prof. Dr. M. Sabri ÇELİK'e ayrıca çalışmalarım sırasında tüm bölüm imkanlarını bana sunan bana her zaman güvenen ve destek olan bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Ali KAHRİMAN'a, ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Erdoğan YİĞİT'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma, çalışmamın uygulama kısmını destekleyen İstanbul Üniversitesi'ne, numune temini ve analizlerim konusunda bana destek olan Eti Maden A.Ş. idareci ve çalışanlarına da teşekkürü borç bilirim.

Bana her konuda destek olan eşime ve aileme de en içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Eylül, 2007

Mehmet Faruk ESKİBALCI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	viii
TÜRKÇE ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 ELEKTROMANYETİK SPEKTRUM.....	3
2.2 MİKRODALGALAR.....	4
2.3 MİKRODALGA FIRINLARIN TARİHÇESİ.....	7
2.4 MİKRODALGA FIRINLARIN KULLANIM ALANLARI.....	9
2.5 MİKRODALGA ISITMANIN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	10
2.6 MİKRODALGAYI ENERJİYE DÖNÜŞTÜRMEDE ETKİN OLAN	
FAKTÖRLER	11
2.7 MİKRODALGA ISITMADA TEMEL KAVRAMLAR	15
2.8 MİKRODALGA FIRINLARIN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ.....	22
2.9 SICAKLIK ÖLÇÜMÜ	24
2.10 SANAYİDE KULLANILAN MİKRODALGA EKİPMANLARI.....	24
2.11 MİKRODALGA FIRINLAR VE SAĞLIĞIMIZ.....	26
2.12 MİKRODALGAYA MARUZ KALMA STANDARDI.....	27
2.13 MİNERALLERİN VE İNORGANİK ÜRÜNLERİN MİKRODALGA	
İLE ISITILMASI.....	27

2.14	MİKRODALGA ÖN İŞLEMLİ CEVHER ÖĞÜTÜLMESİ.....	35
2.15	METAL OKSİTLERİN MİKRODALGA ÖN İŞLEMLİ KARBOTERMİK REDÜKSİYONU.....	37
2.16	MİKRODALGAYA BAĞLI KURUTMA VE ANHİDRASYON	38
2.17	MİKRODALGA DESTEKLİ MİNERAL LİÇİ.....	40
2.18	MİKRODALGAYA BAĞLI KAVURMA ve SÜLFÜR KONSANTRELERİNİN ERGİTİLMESİ	42
2.19	REFRAKTER TİP ALTIN KONSANTRELERİNİN MİKRODALGA DESTEKLİ ÖN UYGULAMASI	43
2.20	MİKRODALGAYA BAĞLI AKTİF KARBON REJENERASYONU .	44
2.21	MİKRODALGA DESTEKLİ ATIK YÖNETİMİ.....	44
2.22	CEVHERLERİN MİKRODALGA ÖN İŞLEMLİ MANYETİK YÖNTEM İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ	46
2.23	CEVHERLERİN MİKRODALGA DESTEKLİ FLOTASYONU.....	47
2.24	MİKRODALGA ÖN İŞLEMLİ KÖMÜR DESÜLFÜRİZASYONU ...	47
2.25	BOR MİNERALLERİ ÜZERİNDE YAPILAN MİKRODALGAYA BAĞLI ÇALIŞMALAR	48
2.26	MİKRODALGA TEKNOLOJİSİNİN EKONOMİSİ.....	49
2.27	BOR MİNERALLERİ.....	50
2.25.1	Genel Bilgi.....	50
2.25.2	Bor Cevherlerinin Endüstride Kullanım Alanları.....	53
2.25.3	Dünya Bor Rezervi	54
2.25.4	Türkiye Bor Yatakları	55
3.	MALZEME VE YÖNTEM.....	57
3.1	DENEYLERE ESAS OLAN NUMUNE.....	57
3.2	KARAKTERİZASYON TESTLERİ.....	58
3.2.1	Numune Hazırlama.....	58
3.2.2	Kimyasal İnceleme.....	58
3.2.3	Isıl Özelliklerin incelenmesi.....	59
3.2.4	Mineralojik İnceleme.....	66
3.2.5	Fourier Transform-Infra Red (FT-IR) Analizi.....	69
3.2.6	Yüzey Karakterizasyonu.....	72
3.2.7	Mikrodalgaya Bağlı Sıcaklık ve Nem Analizi.....	74

3.2.8	Dielektrik Özelliklerinin Tayini.....	77
3.3	YÖNTEM.....	78
3.3.1	Çözünürlük Deneyleri.....	78
3.3.1.1	Temel Bilgiler.....	78
3.3.1.2	Malzeme.....	80
3.3.1.3	Yöntem.....	81
3.3.2	Öğütme Deneyleri.....	82
3.3.2.1	Temel Bilgiler.....	82
3.3.2.2	Malzeme.....	82
3.3.2.3	Yöntem.....	83
3.3.3	Manyetik Ayırma Deneyleri.....	84
3.3.3.1	Temel Bilgiler.....	84
3.3.3.2	Malzeme.....	84
3.3.3.3	Yöntem.....	84
3.3.4	Elektrostatik Ayırma Deneyleri.....	86
3.3.4.1	Temel Bilgiler.....	86
3.3.4.2	Malzeme.....	88
3.3.4.3	Yöntem.....	88
3.3.5	Flotasyon Deneyleri.....	89
3.3.5.1	Temel Bilgiler.....	89
3.3.5.2	Malzeme.....	91
3.3.5.3	Yöntem.....	91
4.	BULGULAR.....	94
4.1	ÇÖZÜNÜRLÜK DENEYLERİ.....	94
4.2	ÖĞÜTME DENEYLERİ.....	102
4.3	MANYETİK AYIRMA DENEYLERİ.....	110
4.4	ELEKTROSTATİK AYIRMA DENEYLERİ.....	118
4.5	FLOTASYON DENEYLERİ.....	123
4.5.1	Normal Flotasyon Deneyleri.....	123
4.5.2	Mikrodalgaya Bağlı Flotasyon Deneyleri.....	130
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ.....	133
	KAYNAKLAR.....	140

EKLER.....	153
EK A : Kolemanit ve Üleksite ait mikrodalgaya bağlı XRD grafikleri...	153
EK B1 : Kolemanit ve Üleksitin farklı sıcaklık, PKO ve farklı sürelerdeki çözünürlük katı kayıpları.....	160
EK B2 :Kolemanit ve Üleksit minerali için mikrodalga enerjiye bağlı çözünürlük deney sonuçları.....	161
EK C1 : -8+4 mm, 5 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları....	162
EK C2 : -8+4 mm, 10 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları ...	163
EK C3 : -8+4 mm, 15 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları....	164
EK C4 : -8+4 mm, 30 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları...	165
EK C5 : -4+2 mm, 5 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları....	166
EK C6 : -4+2 mm, 10 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları ...	167
EK C7 : -4+2 mm, 15 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları...	168
EK C8 : -4+2 mm, 30 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları....	169
EK C9 : -2+1 mm, 5 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları....	170
EK C10 : -2+1 mm, 10 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları ...	171
EK C11 : -2+1 mm, 15 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları....	172
EK C12 : -2+1 mm, 30 dk MD'ye maruz kalma öğütme deney sonuçları...	173
ÖZGEÇMİŞ.....	174

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Elektromanyetik spektrum.....	3
Şekil 2.2	: Bir mikrodalga'nın görünümü.....	4
Şekil 2.3	: Frekans ile güç yoğunluğu ve işleme derinliğinin bağıntısı.....	13
Şekil 2.4	: Dielektrik polarizasyonun şematik görünümü.....	18
Şekil 2.5	: Polarizasyon mekanizmaları.....	19
Şekil 2.6	: Malzemeler ile mikrodalgaların etkileşimi.....	20
Şekil 2.7	: Konvansiyonel ve mikrodalga fırınlarda ısıtma patternleri.....	21
Şekil 2.8	: Mikrodalga fırın içindeki sıcak-soğuk noktaların dağılımı (a) Karıştırıcı olmaksızın ısıtma (b) Karıştırıcı ile ısıtma.....	22
Şekil 2.9	: Bir mikrodalga ısıtma sisteminin basit diyagramı.....	22
Şekil 2.10	: Bir mikrodalga fırının yapısı.....	22
Şekil 2.11	: Bir magnetronun fotoğrafı ve kesit-şekli.....	23
Şekil 2.12	: Döner tüplü mikrodalga fırın.....	25
Şekil 2.13	: Kontinu tip bantlı mikrodalga fırın.....	25
Şekil 2.14	: Kontinu tip bantlı mikrodalga fırın.....	25
Şekil 2.15	: Ağaç tutkallamada kullanılan kontinu tip mikrodalga pres.....	25
Şekil 2.16	: Bor bileşikleri ve kullanım alanları.....	56
Şekil 3.1	: Balıkesir-Bigadiç bor işletmesi yer belirleme haritası.....	57
Şekil 3.2	: Kolemanit mineralinin TG ve DTA eğrisi.....	60
Şekil 3.3	: Üleksit mineralinin TG ve DTA eğrisi.....	60
Şekil 3.4	: Kolemanitin zircir bağ yapısı.....	61
Şekil 3.5	: 540 W'da mikrodalgaya maruz kalmış kolemanitin TG ve DTA eğrisi.....	64
Şekil 3.6	: 900 W'da mikrodalgaya maruz kalmış kolemanitin TG ve DTA eğrisi.....	64
Şekil 3.7	: 540 W'da mikrodalgaya maruz kalmış üleksitin TG ve DTA eğrisi.....	65
Şekil 3.8	: 900 W'da mikrodalgaya maruz kalmış üleksitin TG ve DTA eğrisi.....	65
Şekil 3.9	: Saf ama mikrodalga ön işlemsiz kolemanit mineraline ait XRD analizi	67
Şekil 3.10	: Saf ama mikrodalga ön işlemsiz üleksit mineraline ait XRD analizi	67
Şekil 3.11	: Kolemanitin farklı güç seviyelerinde 45 dk maruz kalma süresindeki XRD analizleri.....	68
Şekil 3.12	: Üleksitin farklı güç seviyelerinde 45 dk maruz kalma süresindeki XRD analizleri.....	69
Şekil 3.13	: Orijinal ve işlem görmüş kolemanit numunelerinin toplu FT-IR analiz sonuçları.....	70

Şekil 3.14	: Orijinal ve işlem görmüş üleksit numunelerinin toplu FT-IR analiz sonuçları.....	71
Şekil 3.15	: Normal kolemanit SEM resmi.....	72
Şekil 3.16	: Normal kolemanit SEM resmi.....	72
Şekil 3.17	: 180 W kolemanit SEM resmi.....	72
Şekil 3.18	: 180 W kolemanit SEM resmi.....	72
Şekil 3.19	: 540 W kolemanit SEM resmi.....	73
Şekil 3.20	: 540 W kolemanit SEM resmi.....	73
Şekil 3.21	: 900 W kolemanit SEM resmi.....	73
Şekil 3.22	: 900 W kolemanit SEM resmi.....	73
Şekil 3.23	: Deneylerde kullanılan Arçelik MD595 model mikrodalga fırın ve infrared termometre.....	74
Şekil 3.24	:Kolemanitin farklı güç seviyelerinde zamana bağlı sıcaklık değişimleri.....	75
Şekil 3.25	: Üleksitin farklı güç seviyelerinde zamana bağlı sıcaklık değişimleri	75
Şekil 3.26	: Kolemanitin mikrodalagaya bağlı bünye suyu kayıp değerleri.....	76
Şekil 3.27	: Üleksitin mikrodalagaya bağlı bünye suyu kayıp değerleri.....	76
Şekil 3.28	: Kolemanit ve üleksit minerallerinin kümülatif elek altı eğrileri...	81
Şekil 3.29	: Çözünme deneyleri akım şeması.....	82
Şekil 3.30	: Öğütme deney akım şeması.....	83
Şekil 3.31	: Manyetik ayırma deneylerinde kullanılan yüksek alan şiddetli tek diskli elektromanyetik ayırıcı.....	85
Şekil 3.32	: Manyetik ayırma deneysel akım şeması.....	86
Şekil 3.33	: Deneylerde kullanılan elektrostatik ayırıcının resmi ve basit şematik diyagramı.....	87
Şekil 3.34	: Elektrostatik ayırma deneysel akım şeması.....	88
Şekil 3.35	: Kolemanit mineralinin zeta potansiyel eğrisi.....	89
Şekil 3.36	: Saf kolemanit numuneleri üzerinde yapılan zeta potansiyel ölçümleri.....	90
Şekil 3.37	: Flotasyon deneyleri akım şeması.....	93
Şekil 3.38	: Deneylerde kullanılan flotasyon cihazı.....	93
Şekil 4.1	: Kolemanit için oda sıcaklığındaki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri.....	95
Şekil 4.2	: Kolemanit için 45 °C'deki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri.....	95
Şekil 4.3	: Kolemanit için 60 °C'deki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri.....	96
Şekil 4.4	: Üleksit için oda sıcaklığındaki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri.....	96
Şekil 4.5	: Üleksit için 45 °C'deki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri.....	97
Şekil 4.6	: Üleksit için 60 °C'deki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri.....	97
Şekil 4.7	: Kolemanit ve üleksit minerallerinin 60 dk sabit çözünme süresinde farklı pülpte katı oranı ve farklı sıcaklıklardaki çözünürlük değerleri..	98
Şekil 4.8	: Kolemanite ait mikrodalga güç seviyesi ve maruz kalma süresine bağlı çözünürlük deney sonuçları.....	98

Şekil 4.9	: Üleksite ait mikrodalga güç seviyesi ve maruz kalma süresine bağlı çözünürlük deney sonuçları sonuçları.....	99
Şekil 4.10	:Kolemanitin mikrodalgaya bağlı çözünürlük değerleri.....	100
Şekil 4.11	: Üleksitin mikrodalgaya bağlı çözünürlük değerleri.....	100
Şekil 4.12	: Farklı güç seviyelerinde 5-10-15-30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri(-8+4 mm).....	102
Şekil 4.13	: -8+4 mm tane boyutundaki kolemanitin mikrodalgaya bağlı d_{80} boyutu değişimi.....	103
Şekil 4.14	: Farklı güç seviyelerinde 5 -10-15 ve 30dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri(-4+2 mm).....	104
Şekil 4.15	: Farklı güç seviyelerinde 5-10-15 ve 30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri(-2+1 mm).....	105
Şekil 4.16	: Farklı güç seviyelerinde 5-10-15 ve 30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri(-8+4 mm).....	106
Şekil 4.17	: -8+4 mm tane boyutundaki üleksitin mikrodalgaya bağlı d_{80} tane boyutu değişimi.....	107
Şekil 4.18	: Farklı seviyelerinde 5-10-15 ve 30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri(-4+2 mm).....	108
Şekil 4.19	: Farklı güç seviyelerinde 5-10-15 ve 30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri(-2+1 mm).....	109
Şekil 4.20	: Üleksit mineraline ait manyetik ürünün optik mikroskoptaki görüntüleri.....	113
Şekil 4.21	: Deneyler sırasında manyetik ürüne gelen metalik pulların görüntüsü	117
Şekil 4.22	: Kolemanit numunesi için uygulanan elektriksel gerilime bağlı olarak Bölme 1 ve 2'ye gelen ürün değişimi.....	119
Şekil 4.23	: Üleksit numunesi için uygulanan elektriksel gerilime bağlı olarak Bölme 1 ve 2'ye gelen ürün değişimi.....	121
Şekil 4.24	: Sabit püpte katı oranı ve 1000 cm ³ hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi.....	123
Şekil 4.25	: Sabit püpte katı oranı ve 1200 cm ³ hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi.....	124
Şekil 4.26	: Sabit püpte katı oranı ve 1000 cm ³ hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi (Şlamsız).....	125
Şekil 4.27	: Sabit püpte katı oranı ve 1000 cm ³ hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi (Şlamlı).....	126
Şekil 4.28	: Sabit püpte katı oranı ve 1200 cm ³ hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi (Şlamlı).....	127
Şekil 4.29	: Sabit püpte katı oranı ve 1000 cm ³ hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi (%6 pülp katı oranı).....	128
Şekil 4.30	: Püpte katı oranının flotasyona etkisinin incelenmesi.....	128
Şekil 4.31	: Sabit püpte katı oranı ve 1200 cm ³ hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi.....	129
Şekil 4.32	: Değişik numunelerin flotasyon davranışları (1200 cm ³ hava miktarı, 1200 d/dk karıştırma hızı, %11 pülp katı oranı).....	131
Şekil 4.33	: 1200 d/dk'da normal ve MD'li numunenin şlamsız flotasyon sonuçları.....	132

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	: Elektromanyetik spektrumun genel sınıflaması	4
Tablo 2.2	: ISM frekansları	5
Tablo 2.3	: Çeşitli uygulamalar için uluslar arası frekans tahsisi.....	7
Tablo 2.4	: Çeşitli frekanslarda MD'nın işleme derinliği.....	14
Tablo 2.5	: 2450 MHz'de MD'nın değişik malzemelerdeki işleme derinliği.....	14
Tablo 2.6	: Bazı oksit ve sülfür bileşiklerinin mikrodalga ısıtılması ile ısıtma zamanına bağlı elde edilen en yüksek sıcaklık değerleri.....	28
Tablo 2.7	: Bazı reaktif cinsi malzemelerin mikrodalga ısıtma oranına dayalı olarak sınıflandırılması.....	29
Tablo 2.8	: Mikrodalga ısıtma için transparant mineraller.....	30
Tablo 2.9	: Oksitler ve Uranyum mineralleri üzerinde yapılan mikrodalga ısıtma deney sonuçları.....	30
Tablo 2.10	: Cevher mineralleri üzerinde mikrodalga ısıtmanın sonuçları.....	31
Tablo 2.11	: Doğal minerallerin mikrodalga ısıtma altındaki etkileri.....	32
Tablo 2.12	: Mikrodalga ısıtmanın değişik minerallere etkisi	33
Tablo 2.13	: Farklı mikrodalga güç seviyelerinde bazı kimyasal ve minerallerin ısınma oranları	34
Tablo 2.14	: Bir bilyeli değirmendeki enerji tüketiminin dağılımı.....	35
Tablo 2.15	: Bir mikrodalga kurutma sisteminde ilk yatırım ve işletme maliyetler.....	50
Tablo 2.16	: En yaygın bor mineralleri ve özellikleri.....	51
Tablo 2.17	: Bazı özel bor kimyasalları için kullanım alanları.....	54
Tablo 2.18	: Dünya bor rezervleri.....	54
Tablo 2.19	: Türkiye'de bulunan bor mineralleri ve B ₂ O ₃ içerikleri.....	55
Tablo 3.1	: Numunelerin tam kimyasal analizi.....	58
Tablo 3.2	: Kolemanitin dehidrasyon verileri.....	62
Tablo 3.3	: Üleksitin dehidrasyon verileri.....	63
Tablo 3.4	: Manyetik ayırma deney koşulları.....	85
Tablo 3.5	: Tüvenan kolemanit kimyasal analizi.....	91
Tablo 4. 1	: Kolemanit mineralinin (normal)manyetik ayırma deney sonuçları	111
Tablo 4. 2	: Üleksit mineralinin (normal)manyetik ayırma deney sonuçları....	112
Tablo 4. 3	: Kolemanit mineralinin mikrodalgaya bağlı manyetik ayırma deney sonuçları.....	115
Tablo 4. 4	: Üleksit mineralinin mikrodalgaya bağlı manyetik ayırma deney sonuçları.....	116
Tablo 4. 5	: Kolemanitin elektrostatik ayırma deney sonuçları.....	118
Tablo 4. 6	: Üleksitin elektrostatik ayırma deney sonuçları.....	120

Tablo 4. 7	: 1000 cm ³ hava miktarında şlamsız yapılan flotasyon deney sonuçları(2lt).....	123
Tablo 4. 8	: 1200 cm ³ hava miktarında şlamsız yapılan flotasyon deney sonuçları(2lt).....	124
Tablo 4. 9	: 1000 cm ³ hava miktarında şlamsız yapılan flotasyon deney sonuçları(4lt).....	125
Tablo 4. 10	: 1000 cm ³ hava miktarında şlamalı yapılan flotasyon deney sonuçları(2lt).....	126
Tablo 4. 11	: 1200 cm ³ hava miktarında şlamalı yapılan flotasyon deney sonuçları(2lt).....	127
Tablo 4. 12	: 1000 cm ³ hava miktarında şlamalı yapılan flotasyon deney sonuçları(4lt).....	128
Tablo 4. 13	: 1200 cm ³ hava miktarında şlamalı yapılan flotasyon deney sonuçları(4lt).....	129
Tablo 4. 14	: Orijinal ve konvansiyonel ısıtmaya bağlı flotasyon deney sonuçları.....	130
Tablo 4. 15	: İki farklı mikrodalga güçte muamele edilmiş numunenin flotasyon sonuçları.....	130
Tablo 4. 16	: Orijinal ve mikrodalgada işlem görmüş numunenin flotasyon sonuçları.....	131

SEMBOL LİSTESİ

ϵ^*	: kompleks permittivite (F/m)
ϵ'	: reel permittivite (F/m)
ϵ''	: imajinal permittivite (F/m)
$\tan\delta$	: dielektrik kayıp faktörü
P_v	: volumetrik güç yoğunluğu (W/m ³)
P_d	: penetrasyon (işleme)derinliği
E	: elektrik alan (V/m)
C_p	: ısı kapasitesi (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
f	: frekans (Hz)
c	: ışık hızı (300 000 km/s)
q	: iyon üzerindeki elektrik yükü
η	: iyon yoğunluğu
λ_0	: dalga boyu
j	: sabit sayı (-1) ^{1/2}
k	: termal iletkenlik (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
s	: saniye
h	: saat
gr	: gram
kg	: kilogram
W	: watt
w	: 1 ton malzemeyi kırmak için gerekli motor gücü (kWh)
w_i	: iş indeksi (kWh/ton)
d_1	: kırılacak ürünün %80'inin geçtiği elek açıklığı (mikron)
d_2	: kırılan ürünün %80'inin geçtiği elek açıklığı (mikron)

ÖZET

CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRMEDE MİKRODALGA ENERJİSİNİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Bu çalışmada mikrodalga enerjinin kolemanit ve üleksit mineralleri üzerindeki etkisi ve bu etki altında kolemanit ve üleksit minerallerinin değişik cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemlerine nasıl cevap verdiği incelenmiştir.

Çalışmayı üç bölüme ayırmak mümkündür. Birinci bölümde; mikrodalga enerjinin yapısı ve mikrodalga enerji ile ısıtma prensipleri hakkında genel bilgiler verilmiş, mikrodalga ısıtma sistemlerinin konvansiyonel ısıtma sistemlerine göre farklılıkları, avantaj ve dezavantajları incelenmiştir. Sanayide kullanılan mikrodalga fırın tiplerinden bahsedilerek özellikleri hakkında bilgiler verildikten sonra malzeme ve madencilik alanında mikrodalga enerji ile ilgili bugüne kadar yapılmış çalışmaların derlemesinin yapıldığı bölümler yer almaktadır. Daha sonra çalışmaya konu olan bor mineralleri hakkında özellikle Türkiye bor kaynakları, bölgeleri, jeolojisi, madenciliği ve kullanım alanları ile ilgili özet bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde kolemanit ve üleksit minerallerinin karakterizasyon testleri yer almaktadır. Bu kapsamda; orijinal ve mikrodalga enerjiye maruz kalmış minerallerin komple kimyasal analizi, XRD ile mineralojik analizi, TG ve DTA ile ısı analizi, FT-IR analizi, Taramalı Elektron Mikroskop ile yüzey özelliklerinin belirlenmesi, minerallerin dielektrik özelliklerinin belirlenmesi gibi testler yapılarak mikrodalga enerjinin minerallerin karakteristik özellikleri üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Sonuçta mikrodalga enerji kullanımının hidrate bor mineralleri üzerinde yapısal bir takım değişikliklere yol açtığı belirlenmiştir. Örneğin kolemanit minerali 900 W güç seviyesinde 45 dk mikrodalga enerjiye maruz kaldığında ölçülebilen yüzey sıcaklığı 320 °C olurken yaklaşık 0,6 mol bünye suyunu kaybetmektedir. Üleksit mineralinin ise aynı koşullarda ölçülen yüzey sıcaklığı 280 °C olurken, yaklaşık 7 mol bünye suyunu kaybettiği tespit edilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ise, mikrodalga enerjinin, kolemanit ve üleksit minerallerinin çözünürlük, öğütülebilirlik, manyetik zenginleştirme, elektrostatik zenginleştirme ve flotasyon ile zenginleştirme işlemlerine olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Her bir konu ayrı bir başlık halinde detaylı olarak ele alınmıştır. Mikrodalga enerjinin etkilerini belirleyebilmek için öncelikle mikrodalga enerjiye maruz bırakılmamış örnekler üzerinde testler gerçekleştirilerek belirli sonuçlar alınmış, alınan bu sonuçlar mikrodalgaya bağlı deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

Kolemanit ve üleksit mineralleri üzerinde yapılan çözünürlük deneylerinde; normal (mikrodalga ön işlem görmemiş) numunelerin deney sonuçlarını incelendiğinde; çözünme süresi ve çözelti sıcaklığı arttıkça numunelerin çözünmeye bağlı katı kayıplarında artış meydana gelmiş, pülöp yoğunluğu arttıkça ise katı kayıplarında bir düşme gözlenmiştir. Mikrodalga enerjinin çözeltideki %katı kayıpları üzerindeki etkisini görebilmek için yapılan deneylerde %10 pülpte katı oranı, oda sıcaklığı ve 60 dk çözünme süresi sabit tutularak bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Mikrodalgaaya bağlı yapılan bu deneylerden güç yoğunluğu ve maruz kalma süresi arttıkça kolemanit ve üleksit minerallerinin çözünürlük %katı kayıplarında normal numunelere kıyasla büyük azalmalar meydana gelmiştir. Bu miktar kolemanit ve üleksit mineralleri için sırası ile %58 ve %60 seviyelerinde gerçekleşmiştir.

Kolemanit ve üleksit minerallerinin mikrodalgaaya bağlı öğütülebilirliklerinin incelendiği deneylerde; öğütme şartları tüm deneylerde sabit tutulmak üzere normal ve mikrodalga enerjiye maruz kalmış numuneler üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

Kolemanit ve üleksit minerallerinin -8+4 mm tane boyutu grubu üzerinde yapılan tüm deneylerde uygulanan mikrodalga enerjinin minerallerin öğütülebilirliğini bariz bir şekilde arttırdığı göze çarpmaktadır. Orijinal kolemanit mineralinin öğütme sonrası d_{80} tane boyutu 5,5 mm'den 3,4 mm'ye kadar düşmesine karşın orijinal üleksit mineralinin öğütme sonrası d_{80} tane boyutu 5,2 mm'den 0,15 mm'ye kadar düşmüştür. Bu sonuç da mikrodalga enerjisinin minerallerin öğütülebilirliklerini önemli oranda arttırdığını göstermektedir.

Uygulanan mikrodalga enerjinin kolemanit ve üleksit minerallerinin manyetik özelliklerine olan etkilerinin araştırıldığı deneylerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde mikrodalga enerjisinin manyetik ayırma sonuçlarına olumlu ya da olumsuz herhangi bir etki yapmadığı tespit edilmiştir.

Yapılan elektrostatik ayırma deneylerinden; uygulanan mikrodalga enerjinin oda sıcaklığında yalıtkan özellik gösteren kolemanitin bu özelliğini daha da aktif hale getirerek düşük voltajlarda bile elektron tutma kabiliyetini arttırdığı, oda sıcaklığında iletken özellik gösteren üleksit minerali üzerinde yapılan mikrodalga enerjiye bağlı deneylerden ise üleksitin mikrodalga enerjisi etkisi ile yalıtkan özellik göstermeye başladığı tespit edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla yapılan konvansiyonel ısıtma da mikrodalga enerji ile aynı etkiyi ortaya çıkarmıştır.

Mikrodalga enerjisinin kolemanit cevherinin flotasyonuna olan etkisi incelendiğinde uygulanan mikrodalga enerjinin şlamın olumsuz etkisini bir miktar ortadan kaldırdığı şlam atılarak yapılan deneylerden alınan sonuçların ise sıcaklıkla doğrudan olumlu yönde etkilendiği ancak konvansiyonel ve mikrodalga ısıtmanın benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak mikrodalga enerjisi ortamın sıcaklığını kısa sürede arttırmasından dolayı kolemanit ve üleksitin yapısal özelliklerini değiştirmekte ve bu da cevher hazırlama ve zenginleştirme sonucunda elde edilen ürünlerin karakterini belirlemektedir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF POSSIBILITY OF MICROWAVE ENERGY USE IN MINERAL PROCESSING

The effects of microwave on the physical properties of colemanite and ulexite minerals and on the mineral processing of these minerals are investigated in this study.

This research is divided into three chapters. The general nature of microwave and the principles of microwave heating are given in the first chapter. In the second chapter microwave related research studies carried out in mineral processing operations so far is given. In the third chapter the present research is presented.

In the second chapter Turkey's Boron mineral districts, their geologies and mining methods are introduced firstly and uses of boron minerals are described. Turkey has 70% of world reserves.

In the third chapter firstly the characterization tests on colemanite and ulexite minerals are given. In this context complete chemical analysis, XRD and microscopic analysis, TG and DTA termic analysis of these minerals are mentioned. The surface characteristics of these minerals are determined also by scanning electron microscope. Dielectric properties of these minerals after microwave applications are determined.

Consequently, use of microwave energy caused structural changes on hydrated boron minerals. Colemanite mineral has lost 0.6 mol crystal water under microwave energy of 900 watt for duration of 45 minutes, and its surface temperature reached to 320 °C. Ulexite mineral has lost 7 mol crystal water and its surface temperature reached to 280 °C under similar microwave conditions.

Further in the third chapter the results of microwave treatment on the solubility, the grindability, magnetic, electrostatic and flotation separation abilities are reported. For this reason grades and recovery values of the concentration tests on original samples are compared with those concentration tests on the samples treated with microwave.

Solubility of colemanite and ulexite increased with duration of the treatment and water temperature, but decreased by solid concentration in the pulp in the solubility tests of colemanite and ulexite samples. To evaluate the effects of microwave energy on the solubility of colemanite and ulexite, a series of tests carried out at room temperature, 10% solid concentration and 60 minutes of treatment duration, the results of these tests compared with the solubility test of original samples. The solubilities of microwave treated samples of colemanite and ulexite increased about 58% and 60% respectively compared to original samples.

The effects of microwave energy on the grindability of colemanite and ulexite were investigated by conducting a series of tests keeping similar conditions constant.

In the feed particle size range -8+4 mm of colemanite and ulexite minerals grindability increased with microwave energy treatment. After the grinding d_{80} size of colemanite decreased from 5,5 mm to 3,4 mm and d_{80} size of ulexite decreased from 5,2 mm to 0.15 mm. Grinding results of both minerals particularly of ulexite were enhanced substantially under the effect of microwave energy.

The use of the microwave energy did not necessarily affect the magnetic properties of colemanite and ulexite minerals according to appropriate tests on high intensity magnetic separators.

Electrostatic separation tests on colemanite samples showed that nonconductance properties of colemanite minerals increased at room temperature and conductance properties of ulexite minerals decreased and changed into nonconductance side gradually. Heat treated samples of both minerals showed also similar tendencies.

The effects of microwave energy on the flotation properties of colemanite minerals were also investigated. The use of microwave energy improved the negative effects of slime to certain degree, but the similar effect was also observed with conventional heating. Flotation of deslimed samples gave better results under certain temperature created by microwave or conventional heating.

Finally the use of microwave energy on the hydrated boron minerals, colemanite and ulexite caused substantial structural changes which are very important in their beneficiations, particularly increasing the temperature of the medium in a very short time.

1.GİRİŞ

Yaklaşık yarım yüzyıldır süregelen araştırmalar sonucunda, mikrodalga kullanımı insan hayatına teknolojik ekipmanlar sayesinde yaygın bir biçimde girmiştir. Bu ekipmanlar arasında; televizyon, radyo, telsiz ve telefonu uydu haberleşme alanında, radarı; askeri ve sivil güvenlik alanında, teleskop cihazını; astronomi alanında, osiloskop cihazını; tıpta, mikrodalga fırını; gıda teknolojisi alanında görebilmekteyiz. Bununla beraber, birçok gelişmiş mikrodalga cihazı da bilimsel araştırmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1-2-3-4].

Mikrodalga'nın kaynağı olan magnetron İngiliz bilim adamları tarafından 1940'lı yıllarda keşfedilmiştir. İlk önce savunma amaçlı olarak II. Dünya Savaşı sırasında radar sistemlerinde kullanılmıştır. Mikrodalga'nın ısı etkisinin olduğu ise bu çalışmalar sırasında tamamen tesadüf eseri Dr. Percy Spencer adlı bilim adamı tarafından tespit edilmiştir. Bu ısı etkisinin ortaya çıkmasından sonra hemen gıdalar üzerinde çalışmalar başlamış ve 1946 yılında mikrodalga ısıtmanın ilk patenti alınmıştır. İlk ticari mikrodalga fırın ise 1947 yılında piyasaya çıkarılmıştır [1-2-5-6-7-8-9].

Bugün mikrodalga tekniği, endüstride kurutma ve/veya ısı olarak ürünlerin transformu için makarna yapımından uçak endüstrisine kadar başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Örneğin; gıda, kağıt, inşaat malzemeleri, metalurji sanayi, çevre ile ilgili olarak radyoaktif atık ve hastane atıklarının zararsız hale getirilmesinde kullanım ve uygulama alanı bulmuştur [5-9-10-11-12-13-14-15].

Mikrodalgalar; televizyon, radyo ve radar teknolojisinde kullanılan iyonize olmamış elektromanyetik dalgalardır. Bunlar arasındaki fark, frekans ve güç yoğunluğundan meydana gelmektedir. Örneğin; VHF radyoda frekans olarak 88-108 MHz kullanılırken mobil telefonlarda bu frekans 1900 MHz olmaktadır ve çıkış gücü 2W civarındadır [3].

Mikrodalga ısıtma sistemlerinde elektromanyetik enerji madde içerisinde doğrudan ısıya dönüşmektedir. Bu nedenle mikrodalga ısıtma sistemlerinde ısı, konvansiyonel sistemlerin tam tersine maddenin içinden dışına doğru taşınır. Materyalin iç bölümleri yüzeyinden daha sıcaktır, bu yüzden suyun içten dışa buharlaşması ve difüzyonu daha basittir. Kurutma boyunca malzemede kabuk oluşumu görülmez ve su kolayca buharlaşır. Malzemenin ısıtılması kimyasal ve fiziksel yapısına bağlıdır. Bu tip ısıtma sistemlerinde ısı; su moleküllerinin rezonansa girmesi ve büyük kayıp açlarına sahip (dielektrik) maddelerin iletim kayıplarının oluşması ile açığa çıkmaktadır. Bu sistem ile konvansiyonel ısıtma sistemleri karşılaştırıldığında ısıtma veya kurutma süresinin çok daha kısa olduğu ve daha homojen bir ısıtma ve kurutma sağladığı görülür. Aynı zamanda bu yöntemle sadece malzeme ısıtılmaktadır. Ocağı, iletim grubunu ve ortamdaki havayı ısıtmaya gerek yoktur. Mikrodalga enerjisi; genellikle ön ısıtma, kurutma ve dehidrasyon için uygulanmaktadır [4-8-9-14-16-17].

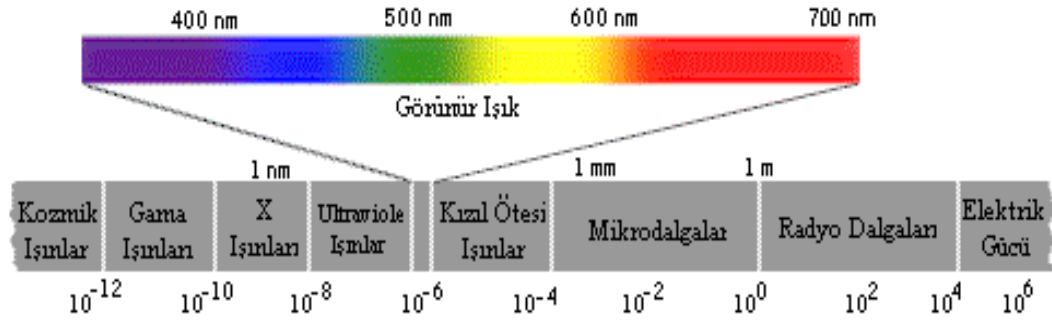
Mikrodalga ısıtma uygulamalarının, önceden ısıtılmış hava (kızıl ötesi) sistemleri ve vakum sistemleriyle çalışabilme olanakları da vardır. Bu yüzden işletme ve yatırım maliyetleri açısından birleştirilmiş bir yöntem olarak daha ekonomik hale gelmektedir.

Mikrodalga enerjisinin son 25 yıldan bu yana madencilik alanında da kullanımına yönelik çalışmaların olduğu ve hızla bu yöndeki denemelerin arttığı gözlenmektedir. Pek çok araştırmacının bu konuda bilimsel ve teknolojik çalışmaları ve yayınlanmış makaleleri bulunmaktadır [2-18-19-20-21]. Bu çalışmalarda mikrodalga enerjinin; öğütmede, kurutma ve anhidrasyonda, refrakter altın cevherlerinin ön zenginleştirilmesinde, kömür desülfürizasyonunda, liç işlemlerinde, kavurmada, karbonun aktivasyonunda, oksitlerin karbotermik redüksiyonunda ve atıkların minimizasyonunda uygulama potansiyelinin olduğu belirtilmektedir [3-17-22]. İlk yatırım maliyetinin yüksek olmasına karşılık en önemli avantajları arasında proses süresini kısaltması ve buna bağlı olarak düşük enerji tüketimi yer almaktadır. Özellikle kurutma ve anhidrasyon ile malzemenin öğütülebilirliğine olan etkileri üzerindeki çalışmalar oldukça ilgi çekicidir [2-9-20-21-23-24-25-26-27-28].

2. GENEL BİLGİLER

2.1 ELEKTROMANYETİK SPEKTRUM

Elektromanyetik dalgalar ses dalgalarına benzemezler çünkü ortamda hareket etmek için moleküllere ihtiyaçları yoktur. Bu elektromanyetik dalgaların hava içinde, katı ortam içinde ve uzay boşluğu içinde seyahat edebileceği anlamına gelmektedir. Şekil 2.1’de bir elektromanyetik spektrumun dalga boyuna bağlı olarak aldığı isimler şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.1: Elektromanyetik spektrum [29]

Tablo 2.1’de Elektromanyetik spektrumun genel sınıflaması verilmiştir.

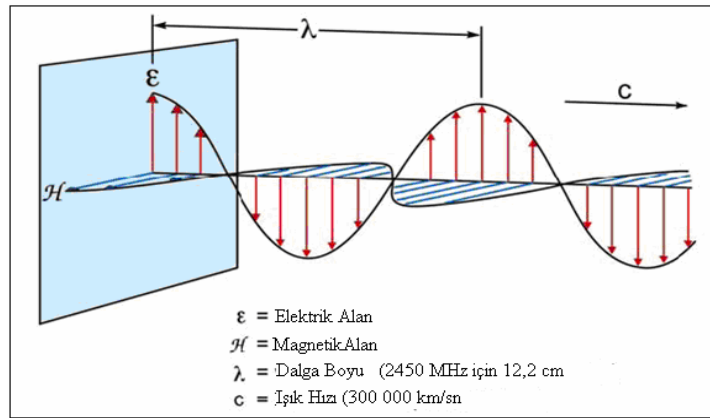
Mikrodalga fırının frekansları 950 MHz ile 2450 MHz arasındadır. Radyo dalgaları 1 metreden başlayarak yüz hatta bin metrelerle ifade edilen dalga boylarına sahip iken gözle görebildiğimiz ışık 400 –750 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) ve mikrodalgalar 1 mm ile 1 m arasında dalga boyuna sahiptirler[29].

Tablo 2.1: Elektromanyetik spektrumun genel sınıflaması [29-142]

	Fotonun Bölgesi	Dalga Boyu	Frekans (Hz)	Foton Enerjisi
İyonlaştıran Radyasyon	Gama ışını	0.00005 nm	6×10^{21}	25 MeV
	X-ışını	0.05 nm	6×10^{18}	25 keV
	Ültraviyole	100 nm	3×10^{15}	12 eV
	Görünür	550 nm	5×10^{14}	2 eV
İyonlaştırmayan Radyasyon	Kızılötesi	10 μ m	3×10^{13}	120 meV
	Mikrodalga	1 cm	3×10^{10}	120 μ eV
	Radyo Dalgası	1km	3×10^5	1 neV

2.2 MİKRODALGALAR

Elektromanyetik yelpaze içinde değişik isimlerle incelenen ışınlar temelde dalgalar halinde yayılan ışınlardır. Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumun dalga boyu 1 mm'den 1 m ye kadar olan ve frekansı 300 MHz den 300 GHz'e kadar olan bölümüne denk gelen iyonize olmamış dalgalardır. Kızıl ötesi ışınlar ile radyo dalgaları arasında yer almaktadır [1-4-5-6-7-8-15-20-22-30-31-32-33-34-35-36-37-38-39-40-41] Elektromanyetik ışınların dalga boyları ve frekanslarıyla tanımlandığı ve enerjinin dalga frekansı ile doğru, dalga boyu ile ters orantılı olduğu bilinmektedir. Mikrodalgalar; diğer elektromanyetik enerji formlarından (görülebilir, ultraviyole ya da kızılötesi ışınlar gibi) daha uzun dalga boylarına sahiptir. Bir elektromanyetik dalga, dalga boyu(λ) , frekans (f) veya enerjisi ile karakterize edilmektedir. Şekil 2.2'de ise bir mikro dalga'nın görünümü verilmektedir.



Şekil 2.2: Bir mikrodalga'nın görünümü[42]

Elektromanyetik dalga birbirine dikey olan elektrik ve manyetik bileşenlerden oluşmaktadır[18]. Her ikisi de iletim yönüne dikey düzlemde. Elektrik ve manyetizma durgun (statik) halde olabilir. Ancak, hareket halindeki elektrik ve manyetik yükleri elektromanyetik dalgayı oluşturur. Bir elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alanları birbirlerine ve dalganın hareket yönüne diktir. Şekil 2.2'deki mavi renk bir elektrik alanını ve yönünü, yeşil renk de bir manyetik alanını ve yönünü göstermektedir. Elektromanyetik dalga eksen çizgisi üstünde tek bir yönde ışıık hızıyla hareket etmektedir[10].

Dalga Boyu: İki tepe noktası arasındaki uzaklıktır.

Frekans: Elektromanyetik dalganın belli bir süredeki ve belli noktalardaki titreşim sayısıdır. Dalga boyu kısaldıkça, frekans artmaktadır, aralarında ters bir orantı vardır. Örneğin AM radyo bandının frekansı bir milyon hertz (1MHz) dir ve dalga boyu yaklaşık 300 metredir. Mikrodalga fırınlar ise 2,45 milyar Hertz (2,45 GHz) frekansında çalışmaktadır ve dalga boyları yaklaşık 12 cm'dir.

Elektromanyetik dalgalar için diğer bir değer hızdır. Hız tüm elektromanyetik dalgalar için (vakum ortamda) aynıdır ve ışığın hızı olan $c=3 \times 10^8$ m/sn dir. Dalga boyu, hız ve frekans değerleri arasında şu bağıntı vardır[8].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

ISM (Industrial, Scientific and Medical use frequencies) frekansları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2: ISM frekansları [36-38]

Frekans	Vakum ortamdaki dalga boyu
433,9 MHz±0,2%	ca. 69,14 cm
915 MHz±13MHz	ca. 32,75 cm
2450 MHz±50 MHz	ca. 12,24 cm
5800 MHz±75 MHz	ca. 5,17 cm
24120 MHz±125 MHz	ca. 1,36 cm

Mikrodalga frekansları 3 band içermektedir[6-7].

Ultra yüksek frekans (UHF: 300 MHz den 3 GHz e),

Süper yüksek frekans (SHF: 3 GHz den 30 GHz'e),

Aşırı yüksek frekans (EHF: 30 GHz'den 300 GHz'e kadar olan)

Mikrodalgalar, radyo ve televizyon yayınlarında kullanılan dalgalara yakın olduğundan, kullanım sırasında ortaya çıkabilecek etkileşimleri önlemek için sadece, ulusal veya uluslar arası telekomünikasyon komisyonlarınca onaylanmış frekanslardan ısıtma amacıyla yararlanılır. Genel olarak ISM (Industrial, Scientific, Medical) bantlar olarak bilinen bu ışınlar 896, 915, 2450, 5800 ve 24125 MHz frekanslı ışınlardır. Gıda sanayiinde kullanılan mikrodalga ışınlar, ev tipi fırınlarda 2450 MHz, sanayide ise 915 MHz frekanslı ışınlardır[8-4-36].

Mikrodalgalar, iletişim alanında geniş uygulamalara sahiptir, bununla birlikte Federal Communication Commission isimli kuruluş (FCC) endüstriyel, bilimsel, tıbbi ve cihaz yapımı uygulamaları için belirli frekanslar tahsis etmiştir. Tablo 2.3'de bazı endüstriyel, tıbbi ve bilimsel frekansları verilmiştir. Ev tipi mikrodalga fırınları için genellikle yararlanılan frekans 2450 MHz'dir [8].

Basit bir aynadan örneğin metalik bir levhadan yansıtılabilen mikrodalgalar, dielektrik arayüzeyde yansımaktadır ve parabolik yansıtıcılar ya da boru antenler ile odaklanabilmektedir. Mikrodalga enerji, 2450 MHz için yaklaşık %50 ve 915 MHz için yaklaşık %85 dönüşüm verimi ile elektrik enerjisinden elde edilebilmektedir[7-43].

Tablo 2.3: Çeşitli uygulamalar için uluslar arası frekans tahsisi[7]

Frekans (MHz)	Toleransı (±)	İzinli Bölgeler
0.07	10 KHz	Rusya
13.56	0,05 %	Dünya geneli
27.12	0,60 %	Dünya geneli
40.68	0,05 %	Dünya geneli
42,49,56,61,66	0,20 %	İngiltere
84,168	0,005 %	İngiltere
432.92	0,20 %	Avusturya, Hollanda, Portekiz, Almanya, İsviçre
896	10 MHz	İngiltere
915	13 MHz	Kuzey ve Güney Amerika
2375	50 MHz	Bulgaristan, Macaristan, Romanya, Rusya, Çek C.
2450	50 MHz	Dünya genelinde
3390	0,60 %	Hollanda
5800	75 MHz	Dünya genelinde
6780	0,60 %	Hollanda
24150	125 MHz	Dünya genelinde
40680		İngiltere

2.3 MİKRODALGA FIRINLARIN TARİHÇESİ

Mikrodalga güç uygulama gereçlerinin geliştirilmesi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanması bundan yaklaşık 50-60 yıl öncesine dayanmaktadır. II. Dünya savaşı sırasında Alman uçak ve denizaltılarının yerini tespit etmeye yönelik çalışmalar yapan bilim adamları Magnetron adını verdikleri ve elektronik dalgaları metal yüzeylerinden yansıtan bir cihaz keşfetmişlerdir. Bu keşif onları, şimdi radar adı verilen cihaza götürecek yolda bir anahtar olmuştur[1-5-16-35-44].

1950’li yıllarda yapılan ilk çalışmalarda mikrodalgaya maruz bırakılan maddelerin özellikleri hakkında güvenilir veriler elde edilmeye çalışılmıştır. Bu ön çalışmalar sonucunda birçok organik ve inorganik maddenin 100 Hz ile 10 GHz frekansları

arasındaki yapısal özellikleri incelenmiştir. Takip eden yıllarda madde özellikleri verilerine ek olarak, magnetronların, güç kaynaklarının ve yan ekipmanlarının tasarımındaki belirgin gelişmeler bu yeni tekniğin ilerlemesine ve güvenilirliğinin artmasına neden olmuştur. Fizik, kimya, elektrik, elektronik, makine, proses mühendisliği, termodinamik, madde fiziği vb. gibi birçok disiplin, bu tekniğin gelişmesindeki gereksinimleri karşılamak üzere işbirliği yapmıştır[8-16-18].

İlk uygulamalar gıda sanayinde görülmektedir. Örneğin; gıda, kağıt, inşaat malzemeleri, metalurji sanayi, çevre ile ilgili olarak radyoaktif atık ve hastane atıklarının zararsız hale getirilmesinde kullanım ve uygulama alanı bulmuştur [8-16].

Son yıllarda mikrodalga fırın tasarım mühendisleri, mikrodalga enerjisinin kontrolünde karşılaşılan iki problemi çözüme kavuşturmuştur. Bunlardan ilki Ayarlı Güç Ünitesi (VPU); burada güç, magnetron çıkışı ile kontrol edilmektedir. Diğeri ise Düğme Modeli Güç Dönüştürücü sistem ki bu sayede kontrol devamlılığı sağlanmıştır. VPU, ön program pişirme seçenekleri sunabilmekte, bu ise şimdilik ev kullanımı için istenen “Akıllı Fırın” düşüncesine en yakın seçenek anlamına gelmektedir.

Ayarlanabilir ısıtma frekansı mikrodalga fırınlardaki bir başka teknik özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu, mikrodalga fırınların ana gelişme unsurları arasında gösterilmektedir. Halen araştırma aşamasında olan bu özellik şu an itibariyle ticari ürünlerde kullanılabilecek düzeyde değildir.

Günümüzde yapılan araştırmalar; içindeki yiyeceklerin ne olduğunu anlayan, malzemenin nem, ağırlık vb. özelliklerine göre program seçeneklerini sunabilen mikrodalga fırınlar geliştirmeye yönelik olarak devam etmektedir.

2.4 MİKRODALGA FIRINLARIN KULLANIM ALANLARI

Mikrodalga enerjisi ile ısıtma, bazı uygulamalarda, diğer ısı kaynaklarına göre büyük üstünlükler sağlamaktadır. Enerjinin maddenin içinde doğrudan ısıya dönüşmesi, anında kontrol edilebilmesine olanak sağlaması ve madde üzerinde onun yapısını bozacak elektriksel bir baskı yaratmamasıdır. Proses kontrolü, diğer yöntemlere nazaran daha hızlı yapılabilmektedir. Isıtma derecesine anında müdahale edilerek ve mikrodalga gücü değiştirilerek ısıtma hemen kontrol altına alınabilmektedir. Kontrol işlemi çok hızlı olduğundan, kullanılan ısıtıcıların boyutları küçük ve kapladıkları alan çok azdır[8-16-37-44].

Mikrodalga ısıtma ile pişirme, haşlama, kurutma, pastörizasyon, buz çözme, sterilizasyon ve temperleme gibi işlemler yüksek verimle kısa zamanda yapılabilmektedir. Pişirme işlemi kısa zamanda, gıda maddesinin her noktasında homojen bir ısı dağılımı oluşturularak yapılan bir işlemdir. İşlemin süresi pişirilecek gıdanın su içeriğine, yoğunluğuna, dielektrik kayıp faktörüne ve kütlesine bağlıdır. Mikrodalga güç uygulama gereçlerinin kullanıldığı alanlar, proses türüne göre sıralanmıştır [8-9-14-16-45-46-47-48 49].

- Hava Akımı Altında Büyük Kütlelerin Kurutulması ve Kalsinasyonu
 - Kağıt ve Karton Sanayi, Bisküvi ve Makarna Sanayii
 - Kuruyemiş ve Çerez Sanayii
 - Tekstil Sanayii (pamuk ve yün)
 - Cam Yünü Üretimi, Ahşap ve Mobilya Sanayii
 - Aktif Karbon Rejenerasyonu, vb. gibi
- Vakumlu Ortamda Isıya Hassas Malzemelerin Kurutulması
 - İlaç Sanayinde, Suya Hassas Kimyasalların Kurutulmasında
 - Makarna Üretiminde ,Şeker Kurutulmasında
 - Soğan, Çay ve İlaç Hammaddesi Olarak, Kuruyemiş ve Çerezlerde
 - Hazır Çorba Bileşenlerinin İmalatında
- Isıl İşlemlerde
 - Beton ve Kaya Parçalamada, Aktivasyon İşlemlerinde
 - Seramik Sinterlemede, Asfalt Rejenerasyonunda
 - Petrol Sondajında, Lastik ve Kauçuk Vulkanizasyonunda

2.5 MİKRODALGA ISITMANIN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

AVANTAJLARI

Enerji Penetrasyonu:

- MD enerjisini madde yüzeyine bırakmaz, frekansına ve geliş açısına göre madde içinde belli bir işleme derinliği vardır.
- MD malzemeleri içten ısıtmaya başladığından yüzeyde yanma oluşmaz
- MD ısıtmada sıcaklık ve zaman ayarlaması kolaydır ve kısıtlama yoktur
- Cisimlerin iç bölgelerinde istenilen nokta hedeflenerek ısıtma yapılabilir

Enerji Absorpsiyonunda Seçicilik:

- Malzemeler mikrodalgayı yansıtıcı, absorplayıcı ve geçirici olarak sınıflandırılabilir. Mikrodalga ısıtmalarda polar ve küçük moleküllü solventler MD enerjisini fazla emerler. Malzemeler kuruyunca veya polarite özellikleri azalınca MD absorplama seçicilikleri azalabilir.

Isıtma Prosesi Çok Hızlıdır:

- Isıtma hızı 30 000°C/s'den 1°C/asır'a kadar ayarlanabilir.
- Malzemenin cinsi, Isınma ısısı, Dielektrik özellikleri, Geometrisi, Isı kayıp mekanizması ve MD ısıtıcının özellikleri gibi parametrelerden ısıtma hızı etkilenir. Örneğin, ısıtma gücü 2 kat artırılınca hız da 2 kat artar.

Malzemenin Tümünde Homojen Isıtma Yapılabilir:

- Konvansiyonel ısıtmalarda olduğu gibi malzeme içinde büyük ısı değişimi oluşmaz, ısıtma istenilen bölgeye ve geometriye göre ayarlanabilir.
- Enerji dönüşüm verimi yüksektir.
- Doğrudan doğruya hedeflenen malzeme ısıtılabilir.
- Heterojen malzemelerde bazı bileşenler ısıtılıp, bazıları ısıtılmayabilir.
- Fırının duvarları, taşıyıcı bantlar ve içindeki havanın ısıtılmasına gerek yoktur.
- Fırının kendisi ısınmadığından, ayrıca soğutma ekipmanlarına ve izolasyona gerek yoktur.
- Isıtma hızla kontrol altına alınabilmektedir, ve daha hızlı proses kontrolü sağlar.
- Isıtmanın başlatılması ve kesilmesi çok hızlıdır.

- Cihazların kapladıkları alan ve hacim çok küçüktür.
- Mevcut tesislere kolaylıkla adapte edilebilir ve montajı kolaydır.
- Ürün kalitesini artırır ve kabuklaşmayı önler.
- Yüzeyde istenilmeyen fiziksel ve kimyasal değişiklikleri önler.
- Ürünün orjinal kokusu ve lezzetini muhafaza eder.
- Proseste daha az atık ürün oluşur.

Sıcaklığa Bağlı Pek Çok Kimyasal Reaksiyonu Başlatabilir

- Kataliz olarak kullanımı (Hot Spots) olabilir.
- Organik sentezlerde, polimerizasyonda, plastiklerde solvent gidermede, emülsiyon bozmada, ilaç sanayinde kullanılabilir[1-5-7-8-30-35-50].

DEZAVANTAJLARI

- MD ısıtma ile bazı ürünler zarar görebilir (derin ısı uygun dağıtılmazsa).
- Ani ısıtma sonucu oluşan basınçla üründe patlama, kabarma ve dağılmalar olabilir.
- Giriş voltajındaki değişimler cihazda ve üründe problem yaratabilir.
- Kurutma işlemlerinde %50'den fazla su içeren sistemler için uygun değildir.
- Sabit yatırım 2500-3000 \$/kWh kadardır.
- Gıda ve kurutma sanayi dışındaki uygulaması yaygınlaşmamıştır[8-30-35-41].

2.6 MİKRODALGAYI ENERJİYE DÖNÜŞTÜRMEDE ETKİN OLAN FAKTÖRLER

Genel olarak bir malzemenin dielektrik özellikleri; sıcaklık, nem içeriği, yoğunluk ve malzeme geometrisi ile ilişkilidir[1-49]

.

Nem İçeriği: Nem içeriği ne kadar fazla ise ısınma o kadar hızlı olur, kritik nem yüzdesinden sonra malzemede bozulmalar başlar.

Yoğunluk: Maddelerin yoğunluğu azaldıkça dielektrik özellikleri azalır, dolayısıyla daha zor ısınırlar. Havanın dielektrik sabiti 1'dir ve elektromanyetik dalgaların büyük bir kısmını geçirir.

Sıcaklık: Malzemenin özelliğine bağlı olarak bazı malzemelerin dielektrik sabiti sıcaklıkla artar, bazılarınınki azalır. Genel olarak maddelerin donma noktalarının altında düşük dielektrik sabitleri vardır. Örneğin; 0°C’deki buzun dielektrik sabiti 0.003 iken, aynı sıcaklıktaki suyun dielektrik sabiti 12 civarındadır.

Frekans: Dielektrik özellikler uygulanan mikrodalganın frekansı ile etkilenmektedirler.

Elektrik İletkenlik: Yüklü iyonların ortamda bulunması MD ısıtmada en kuvvetli etkindir. Kurutma sırasında buharlaşma sonucu konsantrasyon artışı, sona doğru ısıtma hızını hızlandırır.

Termal İletkenlik: MD ısıtmalarda termal iletkenlik etkisi azdır. Çünkü mikrodalga çok hızlı bir ısıtma yöntemidir. MD ışınının malzemeye işleme derinliğinin az olması halinde veya geometrisi düzgün olmayan şekillerde termal iletkenlik homojen ısıtma için önem kazanabilir[49].

Spesifik Isı: Maddenin ısı kapasitesi C_p ; m gram maddenin t_1 (°C) sıcaklığından, t_2 (°C) sıcaklığına ısıtılması için harcanması gereken ısı Q olarak ifade edilirse C_p aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$C_p = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)} \quad (2.2)$$

Dielektrik kayba ve zayıf mikrodalga absorblamaya rağmen düşük spesifik ısıya sahip maddeler mikrodalgalar ile kolaylıkla ısıtılabilir. Bunun nedeni sıcaklığı yükseltmek için birim ağırlık başına daha az kalori gerekmesidir [8].

MD’nin Malzemeye İşleme Derinliği: (Penetration Depth): Büyük kütlelerin ısıtılmasında bu özellik çok önem taşımaktadır. Enerjinin mümkün olduğunca iç bölgelere işlemesi gerekir. Malzemenin dielektrik sabiti (ϵ^I) ve dielektrik kayıp faktörü (ϵ^{II}) malzeme içerisine efektif enerji işleme derinliğinin hesaplanmasına imkan verir [4-8-14]. İşleme derinliği Formül 2.3’deki gibi hesap edilebilir. İşleme derinliği frekans

küçüldükçe artmakta, büyüdüğü azalmaktadır. Bu nedenle madde içerisinde elektromanyetik dalgalar ilerledikçe alan ve güç dağılımı gittikçe zayıflayacağından mikrodalga enerjisi ile ısıtılacak maddelerin kalınlıkları büyük önem taşımaktadır. Eğer numunenin kalınlığı dalganın işleme derinliğinden fazla ise, iç kısımların soğuk kalması olasıdır. Tablo 2.4’de değişik frekanslarda mikrodalga enerjinin işleme derinliği, Tablo 2.5’de değişik malzemelerdeki işleme derinlikleri ve Şekil 2.3’de ise frekans ile güç yoğunluğu ve işleme derinliğinin bağıntısı verilmiştir[9-15-16-32-34-36-40-42-47-51].

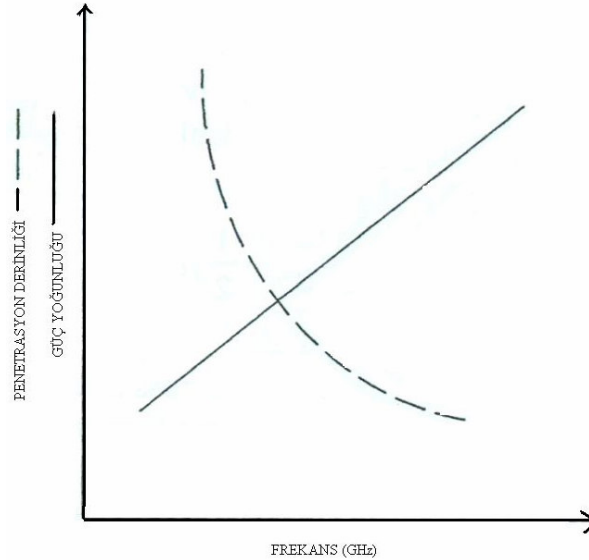
$$P_d = \frac{\lambda_0 \sqrt{2}}{2\pi} \left[\epsilon^1 \left(\sqrt{1 + (\epsilon^{11} / \epsilon^1)^2} - 1 \right) \right]^{-1/2} \quad (2.3)$$

P_d : İşleme Derinliği, cm

λ_0 : Serbest yüzey dalga boyu, $\lambda_0 = c/f$ (c: ışık hızı, f: frekans)

ϵ^1 : Dielektrik sabiti

ϵ^{11} : Kayıp Faktörü



Şekil 2. 3: Frekans ile güç yoğunluğu ve işleme derinliğinin bağıntısı[42]

Tablo 2.4. Çeşitli frekanslarda mikrodalga işleme derinliği[41]

Frekans(MHz)	$\lambda(m)$	Derinlik (m)
5.00	60,000	23,9
13.56	21,100	8,8
27.12	11,100	4,4
40.00	7,500	3,0
915.00	0,328	0,130
2450.00	0,122	0,049

Tablo 2.5: 2450 MHz’de mikrodalga’nın değişik malzemelerdeki işleme derinliği[36]

Malzeme	Sıcaklık °C	İşleme Derinliği cm
Hava	25	∞
Su	25	1,4
Su	95	5,7
Buz	-12	1100
Ekmek	25	2 ... 5
İşlenmemiş patates	25	0,9
Ezilmiş patates	25	0,8
Havuç	25	1
Et	25	0,9 ... 1,2
Kağıt ve Mukavva	25	20 ... 60
Ağaç	25	8 ... 350
İçi boş cam	25	35
Porselen	25	56
Polivinyllchloride20	20	210
Epoxy reçine (Araldite CN-501)	25	4100
Teflon	25	9200
Kuvars cam	25	16000
Tetraklorokarbon	25	3210
Alüminyum	25	0,02
Alüminyumoksit	25	656

2.7 MİKRODALGA ISITMADA TEMEL KAVRAMLAR

Mikrodalgaların endüstriyel, bilimsel, tıbbi ve evsel uygulamaları iki temel gruba ayrılabilir. Bunlar;

- a) Mikrodalga enerjinin ısıya dönüşümünü içeren güç uygulamaları,
- b) Düşük alan şiddetlerindeki mikrodalga alanlarında nesnelere ait testler için yardımcı uygulamalar.

Her iki grup içinde malzemenin elektromanyetik özellikleri çok önemli rol oynamaktadır. Mikrodalga ısıtma sistemlerinde elektromanyetik enerji doğrudan madde içerisinde ısıya dönüştüğü için mikrodalga ısıtma sistemlerinde ısı, konvansiyonel sistemlerin tam tersine maddenin içinden dışına doğru taşınır[16].

Malzemelerin elektromanyetik alandaki etkileşimleri olarak tanımlanan malzeme özellikleri; kompleks dielektrik sabiti (permittivite) (ϵ^*), ve permeabilite (μ) dir. Permittivite elektrik alan içerisindeki malzeme davranışı olarak tanımlanır ve iki kısma ayrılır. Bunlar dielektrik sabiti ϵ^1 olarak tanımlanan gerçek kısım ve kayıp faktörü ϵ^{11} olarak tanımlanan imgesel kısımdır. Bunlar arasında şöyle bir bağıntı vardır [9-14-16-30-32-34-35-40-47-52-53-54].

$$\epsilon^* = \epsilon^1 - j\epsilon^{11} \quad (2.4)$$

ϵ^* : Kompleks dielektrik sabiti; Elektrik alan içerisindeki malzeme davranışdır.

j : $j=(-1)^{1/2}$

ϵ^1 : Dielektrik sabiti; malzemenin, içinden geçen mikrodalga enerjii depolama kabiliyetinin ölçüsüdür

ϵ^{11} : Kayıp faktörü; malzeme içerisindeki elektrik-alan enerjisinin ısı kaybı olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, “kayıp” faktörü, giren mikrodalga enerjisinin miktarını simgelemektedir ve frekansa bağlı olarak değişir, bu enerji, malzeme içerisinde ısı olarak dağılmaya başlamasıyla kaybolmaktadır. Bu yüzden, yüksek kayıp faktörü olan bir malzeme, mikrodalga enerji ile kolayca ısıtılabilir[6-7-8-15-16-18-19-20-40].

İyonik İletim:

İyonlar kendi polarite ve elektrik alanlarının tersi yönünde hareket ederler. Hareket sonucu oluşan kinetik enerji, moleküllerin çarpışmasına ve ısınmasına neden olur. Böylece iki kademeli olarak, elektromanyetik alan önce kinetik enerjiye sonra kinetik enerji ısı enerjisine dönüşür. Birim hacimde oluşan güç aşağıdaki formül ile gösterilir[49].

$$P_v = t^2 q \eta \mu \quad (2.5)$$

P_v : Birim hacimde oluşan güç yoğunluğu,

q : iyon üzerindeki elektrik yükü,

η : iyon yoğunluğu (birim hacimdeki iyon sayısı)

μ : iyonların hareket kabiliyeti

Dipol Rotasyonu:

Doğadaki moleküllerin büyük bir kısmı dipol yapıdadır. Asimetrik yük içeren moleküller dipol moleküllerdir. Su dipol moleküllere en iyi örnek olarak verilebilir. Dipol moleküller elektromanyetik alandaki frekans değişiminden etkilenerek polaritelerini hızla değiştirebilirler. Böylece oluşan hareket sonucunda ısınma meydana gelir. Mikrodalgalar malzeme içerisinden geçerken polar moleküller kendilerini aynı sıraya dizmeye çalışırlar, elektromanyetik alanın kalkması ile gevşerler. Dalganın frekansına bağlı olarak tekrar dizilirler, tekrar gevşerler. Bu hareket saniyede birkaç milyon defa tekrarlanır. Böylece dipol moleküllerin neden olduğu hareketler malzemenin içerisinde kinetik ve ısı enerjisi olarak depolanır[49].

Elektromanyetik alandaki bu iyonik iletim ve dipol rotasyonu mikrodalga ısıtma süresince sıcaklıkta bir artmaya sebep olur. Bundan dolayı malzeme homojen bir şekilde ısıtılabilir.

$\tan\delta$: Kayıp tanjantı; sıklıkla kullanılan bir diğer parametre de kayıp tanjantıdır. Bu kayıp faktörünün dielektrik sabite oranı olarak tarif edilmektedir[4-19].

$$\tan \delta = \frac{\epsilon^{11}}{\epsilon^1} \quad (2.6)$$

Dielektrik malzemelerin permitivitesi yani elektrik alan içerisindeki davranışı şu parametrelere bağlıdır; frekans, sıcaklık, malzeme kompozisyonu (su partiküllerinin yapısı ve tuz oranı), yoğunluk ve fiziksel hal (katı veya sıvı, örneğin su ve buz mikrodalga frekanslarda farkı dielektrik özelliklere sahiptir).

Mikrodalga enerjisinin dielektrik madde ile olan etkileşimi çok karmaşık olup, bu ilişkide fiziksel parametreler çok önemli rol oynar. Madde içinde harcanan güç, yine madde üzerinde oluşan elektrik alan büyüklükleri kullanılarak hesaplanır. Maddenin dielektrik özelliğinden dolayı elektro manyetik alan dielektrik yapıya nüfuz ettikçe zayıflar. Bu nedenle işlenecek maddenin kalınlığı ile uygulanacak mikrodalga frekansı arasında çok önemli bir ilişki vardır. Buradan da anlaşıldığı gibi mikrodalga fırın içerisindeki elektrik alan şiddeti en önemli parametrelerden biridir[14-16].

Birim hacim başına absorbe etme gücü P (W/m^3) ile ifade edilen dielektrik ısıtma ve iletkenlik arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmiştir[4-8-15-51-55-56-57].

$$P_v = kfE^2 \epsilon^1 \tan \delta \quad (2.7)$$

$\tan \delta = \frac{\epsilon^{11}}{\epsilon^1}$ olduğunu biliyoruz, formülü yeniden düzenlediğimizde,

$$P_v = kfE^2 \epsilon^{11} \quad (2.8)$$

E ; elektrik alanı, (V/m)

k ; elektriksel iletkenlik, ($2\pi\epsilon_0=55,603 \times 10^{-12}$ F/m)

f ; mikrodalga frekansı, (Hz)

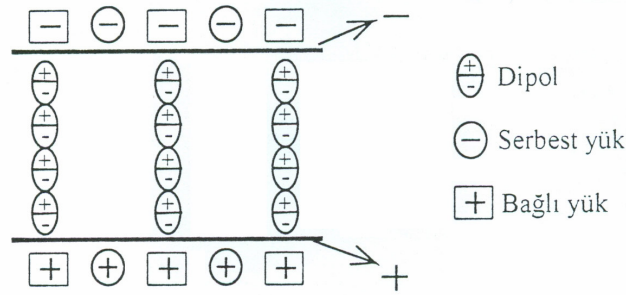
ϵ^{11} ; kayıp faktörüdür.

ϵ_0 ; boş alan geçirgenliği, $8,86 \times 10^{-12}$ F/m

Bu denklem malzeme tarafından absorbe edilen gücün, frekans, dielektrik sabiti, kayıp tanjanı ve elektrik alanın karesi ile doğru orantılı olarak değiştiğini göstermektedir [5-15].

Dielektrik maddeler yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalarına maruz kaldıklarında ısınmaktadır. Bu ısı, elektrik alanının madde üzerindeki yükleri polarize etmesi ve bu polarizasyonun alternatif olarak değişen elektrik alanını takip edememesi sonucu dielektrik madde içerisinde güç disipasyonu oluşmasıyla açığa çıkmaktadır[16].

Elektrik alanın dielektrik madde ile ilişkisi yüklü parçacıkların uygulanan alana olan tepkileri ile bağlantılıdır. Şekil 2.4’de dielektrik polarizasyonun şematik gösterimi verilmiştir.

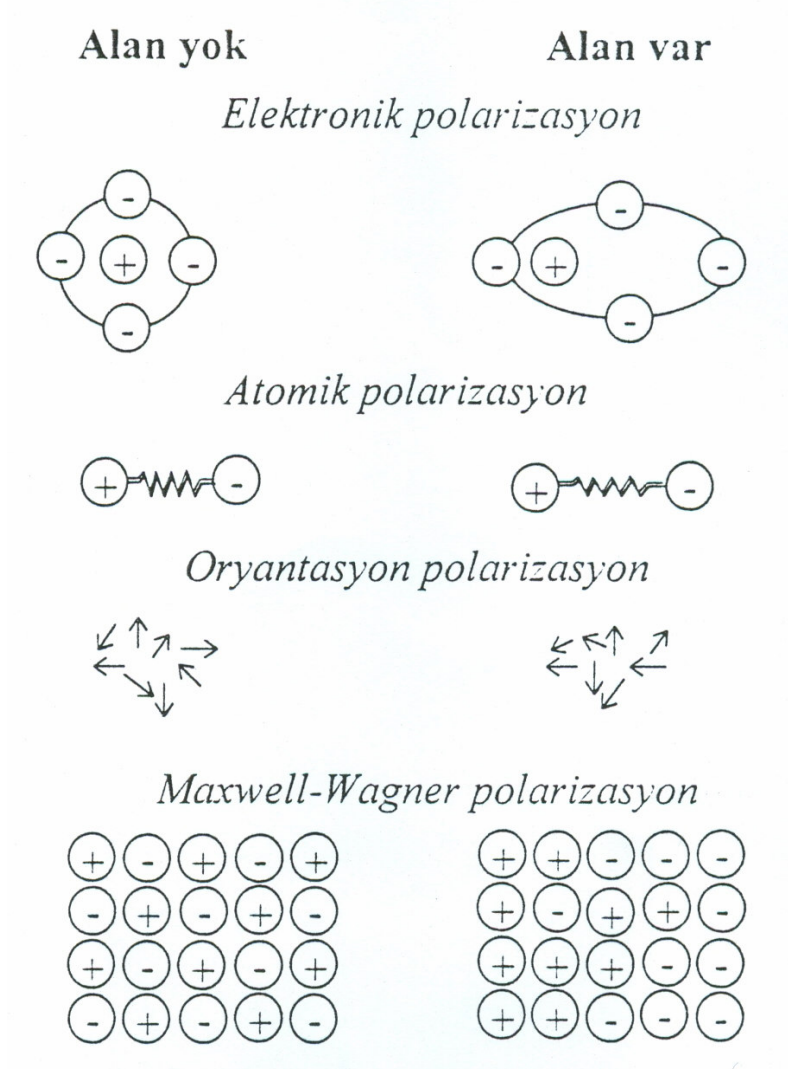


Şekil 2.4 : Dielektrik polarizasyonun şematik görünümü[16]

Bu yüklü parçacıkların denge konumundan uzaklaşmaları uygulanan alana etkiyecek endüklenen dipollerde bir artışa neden olur. Bu endüklenen polarizasyon temelde 4 ayrı polarizasyonun etkisidir[16-32]. Bunlar;

- 1-Çekirdeklerin çevresindeki yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkan elektronik polarizasyon,
- 2-Molekül oluşumunda yüklerin dengesiz dağılımından kaynaklanan atom çekirdeklerinin bağlı yer değiştirmesi sonucu oluşan atomik polarizasyon,
- 3-Polar dielektrik olarak bilinen ve değişken elektrik alanının zorlanması sonucu reoryantasyona eğilim gösteren kalıcı dipoller içeren oryantasyon polarizasyonu,
- 4-Heterojen sistemlerde bileşenler arasındaki ara geçişlerde oluşan yükler sonucu meydana gelen uzay-yükü veya Maxwell-Wagner polarizasyonudur[16].

Şekil 2.5’de polarizasyon mekanizmaları gösterilmiştir.



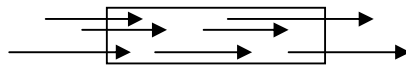
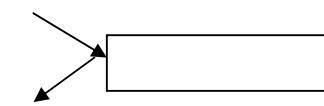
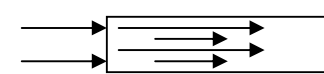
Şekil 2.5: Polarizasyon mekanizmaları[16]

Mikrodalgalar metal yüzeylerinden yansdıkları için metaller ısınmazlar. Genel olarak metaller yüksek iletkenliğe sahiptir ve bu yüzden iletken olarak sınıflandırılırlar[9]. İletkenler, ısınma olmadığı için mikrodalga fırınlar içinde dalga klavuzu amacıyla kullanılmaktadır [5-9-15].

Mikrodalgalar için saydam malzemeler ise yalıtkan olarak sınıflandırılmaktadır. Örneğin; cam, seramik ve hava gibi, bunlar mikrodalgayı geçirirler veya çok az ısınırlar. Yalıtkan malzemeler ise mikrodalga fırınlar içerisinde malzemenin ısınmasını desteklemek için sıklıkla kullanılmaktadır.

Mikrodalga enerjisinin en iyi absorblandığı malzemeler kolaylıkla ısıtılabilir ve bu malzemeler “dielektrikler” olarak sınıflandırılmaktadır. Su molekülleri içeren maddeler bunlara örnek olarak verilebilir[16].

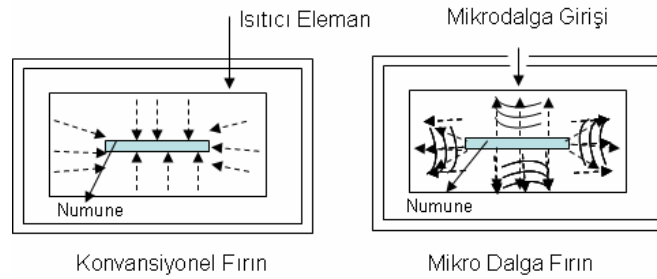
Dördüncü tip malzeme türü matriks yapı dediğimiz bir kısmı yüksek kayıplı malzeme iken diğer kısmı düşük kayıplı malzemeden oluşan maddedir. Bu tür malzemeler mikrodalga ısıtma teknolojisinde selektif ısıtma açısından önemli avantajlar sağlamaktadır ki, konvansiyonel yöntemlerde selektif ısıtma söz konusu olmamaktadır[2]. Şekil 2.6’da malzemelerin mikrodalga enerji ile etkileşimi gösterilmektedir [1-3-5-6-7-9-10-11-15-22-32-33-36-58-59].

	Malzeme Tipi	Penetrasyon
	Saydam(Transparan) (Isınma Yok)	Tamamen Geçirme
	İletken (Isınma Yok)	Yok
	Absorbe Edici (Isınma Var)	Tamamen Absorbe Edici
	Absorbe Edici (Karıştırılmış) (a)Matriks: Düşük Kayıplı Yalıtkan (b) Fiber/Parteküller/ İlaveler (absorblayıcı Malzeme)	Tamamen Absorbe Edici

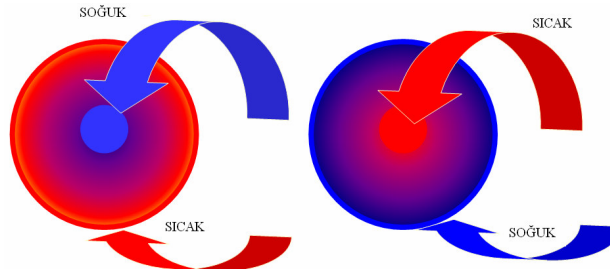
Şekil 2.6: Malzemeler ile mikrodalgaların etkileşimi [5-6-7-19]

Dielektrik özellik bakımından non-homojen malzemeler düzenli ısıtma yapmazlar. Malzemenin bir kısmı diğer kısmından daha fazla ısınmaktadır. Bu olay genellikle ısı kaybı olarak bilinir. Bu durum, örneğin iyice karıştırılması ya da akıcı hale getirilmesi şartları sağlanarak minimum edilebilir[7].

Yarı iletken malzemelerde mikrodalga ısıtmanın verimliliği ilk sıcaklığına bağlıdır. Gerçekte belirli kritik sıcaklıkların üzerinde aynı yalıtkan malzemeler mikrodalga ısıtma için yanıt verir hale gelmektedir. Mikrodalga ısıtmanın büyüklüğü aynı zamanda malzemenin boyutuna da bağlıdır. Örneğin çok ince boyutlu metaller (iletken), bir mikroark prosesinden geçerek mikrodalga ile ısıtılabilir. Ek olarak manyetit, silikon karbid ya da karbon gibi düşük kayıplı ya da yalıtkan malzemeler bir mikrodalga ısı kolaylaştırıcısı ile ısıtılabilir[19]. Konvansiyonel ve bir mikrodalga fırında ısıtma paternleri Şekil 2.7’de verilmiştir[15]. Fırın içerisindeki sıcak-soğuk noktaların dağılımı ise Şekil 2.8’de verilmiştir. Ölçümler 9 adet pyreks kap içerisine konan birer litrelik distile su ile gerçekleştirilmiştir. Fırın maksimum güçte iki dakika çalıştırılmış ve su sıcaklıkları ölçülmüştür [35].

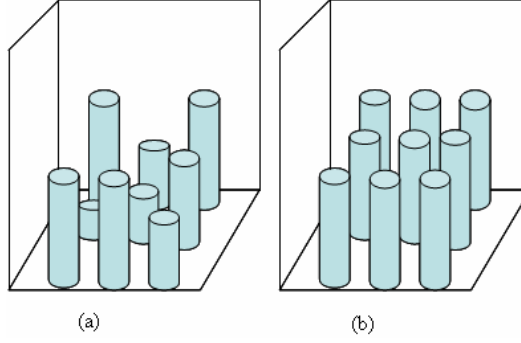


(a)



(b)

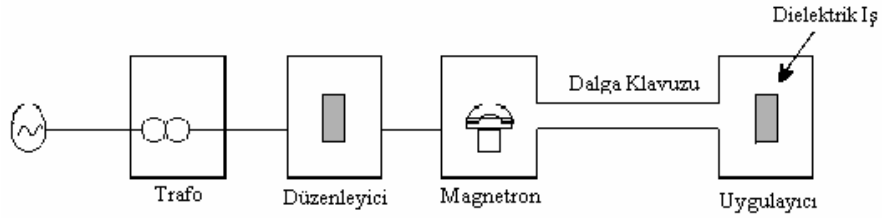
Şekil 2.7: Konvansiyonel ve mikrodalga fırınlarda ısıtma paternleri[15-49].



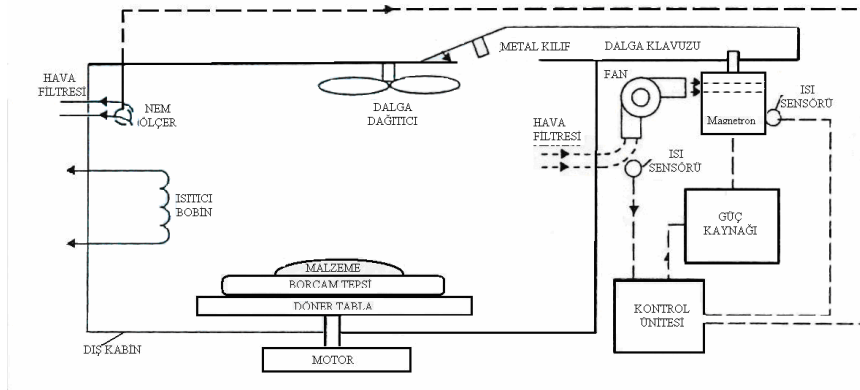
Şekil 2.8: Mikrodalga fırın içindeki sıcak-soğuk noktaların dağılımı (a) Karıştırıcı olmaksızın ısıtma (b) Karıştırıcı ile ısıtma[35]

2.8 MİKRODALGA FIRINLARIN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Mikrodalga fırınlarda ısıtma sistemi 4 temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; güç temini, magnetron, hedef malzemenin ısıtılması için uygulayıcı ve mikrodalgaların jeneratörden uygulayıcıya taşınması için kullanılan dalga klavuzudur. Şekil 2.9’da mikrodalga ısıtma sisteminin basitleştirilmiş diyagramı ve Şekil 2.10’da ise bir mikrodalga fırının yapısı verilmiştir[4-6].



Şekil 2.9: Bir mikrodalga ısıtma sisteminin basit diyagramı[7]

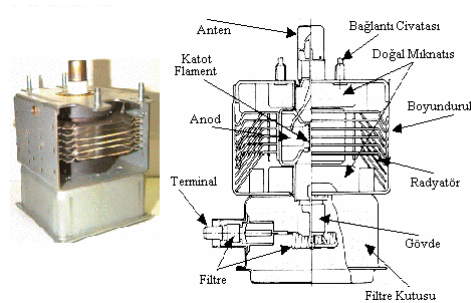


Şekil 2.10: Bir mikrodalga fırının yapısı [42]

Mikrodalgalar ışık hızında yayılırlar. Mikrodalga kaynağı açılır açılmaz, ısıtılacak kütleye nüfuz eder ve derhal enerji dönüşümünü başlatır. Kaynak kapatıldığında ısıtma prosesi derhal durur. Polar olmayan maddeler (teflon, hava, kuvars camı) mikrodalga enerjisini ısı enerjisine dönüştüremezler. Mikrodalgalar bu maddelerden geçerken zayıflamazlar. Genelde, enerji dönüşümünü yerine getiren ve ısı kaynağını temsil eden fırın, ısıtılacak maddeye mikrodalga gönderir. Metalik fırın muhafazası (mikrodalga bölme) sadece maddeye enerji yönelterek enerji kaybını önlemek ve personeli mikrodalga radyasyona maruz bırakmamak için kullanılmaktadır.

Magnetron; bir mikrodalga fırının kalbi durumundadır ve elektrik enerjisini mikrodalga radyasyona dönüştürmektedir. Bunun için şehir şebekesinden gelen düşük voltajlı alternatif akım, bir transformatör tarafından gerekli seviyeye yükseltilmekte ve bir kondansatör (ki diod ile birleşmiş) bu yüksek voltajı filtreleyerek onu doğru akıma dönüştürmektedir. Magnetron sabit bir frekans ve güç üreteceğinden dolayı magnetrona girişteki elektrik güç kaynağında fazla salınım olmaması ve cihazın çalışırken fazla ısınmaması için ise soğutulması gereklidir. Endüstriyel, Bilimsel ve Medikal uygulamaları için magnetronlar; a)mikrodalga fırın uygulamaları ve b)endüstriyel prosesler için olmak üzere iki guruba ayrılabilir[4-8-30-60].

Mikrodalga fırınlar için tipik bir magnetron yapısı ve kesit görünümü Şekil 2.11’de verilmiştir. Mikrodalga fırınlar için magnetron dizaynı ekonomik faktörlere bağlıdır ve son yıllarda teknolojiye ileriye adımlar ile tüp maliyetlerinde büyük azalmalar olmuştur. Tipik bir mikrodalga fırın magnetronu 2,45 GHz frekansta, 600-900 W çıkış gücünde %70-75 verim ile çalışmaktadır ve 3,5-4 kV anot voltajına ihtiyaç duymaktadır[18].



Şekil 2.11: Bir Magnetronun fotoğrafı ve kesit şekli [8-21]

2.9. SICAKLIK ÖLÇÜMÜ

Mikrodalga radyasyonu sırasında sıcaklığın ölçümü en büyük problemlerden birini teşkil etmektedir[5]. Luxtron fluoro-optik ya da accufibre sistemleri, 400 °C üzerinde sıcaklık ölçümlerinde kullanılabilir, ancak pek çok endüstriyel uygulamalar için çok kırılabilir olabilir. Optik pyrometre ve thermocouple (metalik probe) yüksek sıcaklıkları ölçmek için kullanılabilir. Optik pyrometre, örneğin thermovision infrared kamera, sadece yüzey sıcaklığını kaydedebilir, ki, bu her zaman örneğin içsel sıcaklığından çok düşük olmaktadır. Thermocouple (metalik probe) sıcaklık ölçümü için kullanıldığı zaman, örnek ve thermocouple arasında oluşan ark, thermocouple performansında hatanın meydana gelmesine yol açabilir. Son geliştirilen sıcaklık ölçüm gereçlerinden biri de ultrasonik ısı problemleridir ki, bunlar 1500 °C üzerinde sıcaklıkları ölçebilir[5-7].

Mikrodalga radyasyona maruz kalan malzemenin sıcaklığı, mikrodalga güç kapatıldıktan sonra thermocouple, sıcak malzemenin içerisine derhal sokularak da ölçüm yapılabilir[7].

2.10 SANAYİDE KULLANILAN MİKRODALGA EKİPMANLARI

Sanayide kullanılan mikrodalga ekipmanları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir[49-52-61-62];

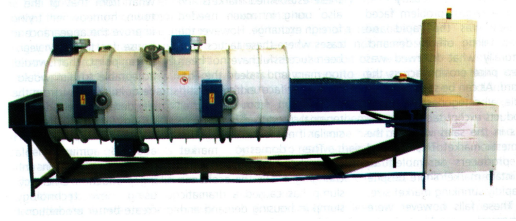
- Hareketli MD Cihazı (Traveling wave guide) (Elyaf, Kağıt ve Gıda sektörlerinde)
- Tek Hücreli MD Fırın (Single Mode Cavity) (Seramiklerde, gıda, evlerde vb.)
- Çok Hücreli MD Fırın (Multi Mode Cavity) (Seramik Sinterleme, Gıda ve Kimyasalların Kurutulması ve Dehidrasyonu)
- Sürekli Sistemlerde Kullanılan Rezonans Tipi (büyük hacimli cisimlerde)
- Hareketli Polarize Edilmiş MD Cihazı (Homojen Isıtmalar için)
- Daldırılabilir MD Cihazları (Horn Type) (Beton, Kaya Kırma ve Petrol Sondajında)
- Elektromanyetik Lensler (Tıbbi Uygulamalarda)

Şekil 2.12, 2.13, 2.14 ve 2.15’de çeşitli tip sanayi amaçlı mikrodalga fırınlar ve özellikleri verilmiştir.



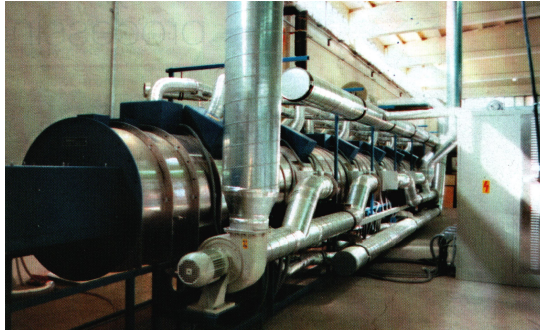
- Granüllerin, ince tozların ve fiberlerin (elyaf) ısı uygulamalarında kullanılabilmektedir.
- Mikrodalga gücü:
2,4-10kW / 2,45 ve 5,8 GHz

Şekil 2.12: Döner tüplü mikrodalga fırın[52-143]



- Endüstriyel uygulamalar için,
Kurutma, ısıtma ve tavlama uygulamaları
(toz, granül ve katılar için)
Mikrodalga gücü: 100 kW ve üstü .

Şekil 2.13: Kontinu tip bantlı mikrodalga fırın[52-143]



- **Tesis Boyutları:**
- Uzunluk 15 m
- Mikrodalga gücü: 60 kW
- 1900 W'lık 32 Magnetron

Şekil 2.14: Kontinu tip bantlı mikrodalga fırın[52-143]



- **Tesis Boyutları:**
- 8100 mm x 8125 mm
- Mikrodalga gücü: 498 kW

Şekil 2.15: Ağaç tutkalamada kullanılan kontinü tip mikrodalga pres[52-143]

2.11. MİKRODALGA FIRINLAR VE SAĞLIĞIMIZ

Yapılan araştırmalarda doğrudan mikrodalgalara aşırı maruz kalan kişilerde yanıklar oluştuğu, sperm hücrelerinin öldüğü, hatta iç organlarda haşlanma ve pişme gibi sonuçlar görülebileceği saptanmıştır. Ancak kan dolaşımının hızlı olduğu kaslı bölgelerde oluşan ısı, kan akışı ile hızla vücuda yayılacağından ciddi hasarlar görülmeden kaslarda oluşan ısının uyarıcı olabileceği kaydedilmiştir. Özellikle kan akışının nispeten az olduğu gözlerin mikrodalgalara maruziyeti katarakta ve ciddi göz hasarlarına neden olabilmektedir. Ancak, mikrodalga fırınlarda sızıntıya karşı alınan tedbirler sonucu mikrodalga fırın kullanımına bağlı kazalar veya olumsuz sağlık sonuçlarının kayıtlara geçmediği bilinmektedir. Genellikle kayda geçen kazalar, mikrodalga fırından aşırı ısınan yiyeceğin teması sonucu ısınan kapları alırken oluşan yanıklar ve besinin ısınması sonucu oluşan sıcak buharın ısıtma kabının açılması sırasında neden olduğu yanıklardan meydana gelmektedir[31-63-64-144].

Bütün elektromanyetik ışınlar foton adı verilen parçacıklar halinde yayılmaktadır. Fotonların sahip olduğu enerji dalga boyları ile ters orantılıdır. Mor ötesi (UV) ışınları, X ışınları ve Gamma ışınları sahip oldukları kısa dalga boylarına bağlı olarak yüksek enerji düzeylerine sahiptir. Bu yüksek enerji düzeylerine maruz kalan organik moleküllerin yapısında oluşan kimyasal değişiklikler organizmalarda mutasyonlar ve kanserli hücre oluşumları ile sonuçlanabilir. Ancak mikrodalga fotonlarının enerji düzeyleri o denli düşüktür ki, ancak bir su molekülünün (+) ve (-) kutupları arasında titreşmesine neden olabilir. Bu nedenle mikrodalga ile pişirilmiş besinlerde sağlığa zararlı kimyasal değişimler oluşması beklenmemektedir[31-64].

Mikrodalgalar, ılık ışınları gibi çok hızlı hareket ettiklerinden besin tarafından kısa bir süre için soğurulduktan sonra geri yayılır. Besinin içindeki su tarafından soğurularak ısıya dönüşmeyen kısım besin maddesi içinde birikime neden olmadan besin maddesini terk eder. Mikrodalga fırında pişmiş bir besinde mikrodalga radyasyonu birikmiş olma ihtimali yoktur[144].

2.12 MİKRODALAGAYA MARUZ KALMA STANDARDI

Mikrodalga santimetre kare başına miliwatt olarak düşen güç yoğunluğu olarak ölçülmektedir ve MD/cm^2 şeklinde gösterilir. Mikrodalga fırınlardan yayılan radyasyonların (mikrodalgaların) güç yoğunluğu mesafenin karesi ile ters orantılı olarak hızlı bir şekilde azalır. Örneğin yüzeyden 5 cm mesafe uzaklıkta ölçtüğümüz 5 MD/cm^2 'lik güç yoğunluğu 30 cm'de 1,5 MD/cm^2 'ye, 1 metrede 0,01 MD/cm^2 'ye kadar düşmektedir. [7-8].

2.13. MİNERALLERİN VE İNORGANİK ÜRÜNLERİN MİKRODALGA İLE ISITILMASI

Mikrodalga enerjinin cevher hazırlama endüstrilerinde bir potansiyel olarak kullanılmaları 1960'lerden sonra gelişmiştir[109]. 1960 yılından itibaren seramik endüstrisinde uygulanması çalışmalarına başlanmıştır. Genellikle seramiklerin sentezlenmesi, kurutulması, kalsinasyonu ve sinterlenmesinde mikrodalga enerji kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışmalar arasında Derling ve Abicht (1996), BaTiO_3 bazlı seramiklerin 2,45 GHz mikrodalga frekansında ve 1 kW mikrodalga gücünde sinterlenmesi çalışmaları, Patil ve diğ.(1992) oksit bazlı $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$ karışımlarının 2,45 GHz de sinterleme çalışmaları bulunmaktadır [15-65-66-67-68-69-70-71-72-73].

1967'lerde Ford ve Pei, pek çok reaktif sınıfı metal oksitler ve sülfidlerin ısıtılması için mikrodalga enerji kullanmışlardır. Deneylerde 2450 MHz'deki mikrodalga enerji; 10 gr ile 200 gr arasındaki öğütülmüş örneklerin ısıtılmasında uygulanmıştır. Test sonuçları Tablo 2.6'da verilmiştir. Bu çalışmada koyu renkli bileşiklerin yüksek sıcaklıklara (1000°C) hızlıca ısıtılabilirdiğini ve koyu renkli bileşiklerin ısıtma oranının, açık renkli bileşiklerin ısıtma oranından daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Bundan başka; Wong (1975) ve Tinga (1988-1989) pek çok metal oksidin mikrodalga ısıtma altındaki davranışını rapor etmişlerdir. Bu sonuçlar yayınlanmış verilerle

karşılaştırılmış ve ısıtma oranlarına dayalı olarak, hiperaktif, aktif, zor ısınır ve aktif olmayan olarak dört sınıfa ayrılmışlardır. Tablo 2.7’de bu çalışmadaki derleme sonuçları verilmiştir. Bunlar mikrodalga enerjinin, mineral ve inorganik bileşiklerin ısıtılmasında etken olabildiğini göstermektedir[5-23].

Tablo 2.6: Bazı oksit ve sülfür bileşiklerinin mikrodalga ısıtılması ile ısıtma zamanına bağlı elde edilen en yüksek sıcaklık değerleri[1-23].

Bileşik	Isıtma zamanı (dk)	Max. Sıcaklık (°C)	Bileşik	Isıtma zamanı (dk)	Max. Sıcaklık (°C)
Al ₂ O ₃	240	1900	FeS	6	800
C	0,2	1000	MgO	40	1300
CaO	40,0	200	MnO ₂	^a	-
Co ₂ O ₃	3 ^a	900	MoO ₃	46	750
CuO	4	800	MoS ₂	0,1	900
CuS	5	600	Ni ₂ O ₃	3,0 ^a	1300
Fe ₂ O ₃	6	1000	PbO	13	900
Fe ₃ O ₄	0,5	500	UO ₂	0,1	1100

a: Şiddetli bir reaksiyon göstermektedir; MnO₂ den dolayı sıcaklık ölçülememektedir.

Chen ve diğerleri (1984) ayrı ayrı 40 mineralin mikrodalga enerji ile (2450 MHz) ısıtılmasının sonuçları rapor etmişlerdir. Örneklerin mikrodalga radyasyona maruz kaldığı anlardaki kesin sıcaklıkların bildirilmesinin zorluğundan dolayı yazarlar sıcaklıklardan bahsetmemişler, onun yerine mikrodalga güç değerlerini dile getirmişlerdir. Mineral örnekleri mikrodalga ısıtmadan önce ve sonra karakterize edilmişlerdir. Tablo 2.8, Tablo 2.9 ve Tablo 2.10’da bu sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2.7: Bazı reaktif cinsi malzemelerin mikrodalga ısıtma oranına dayalı olarak sınıflandırılması[5-7]

Malzeme Sınıflaması	Isıtma oranı (rapor edilen)	Max. Sıc. (°C)	Not
a) Hiperaktif malzemeler	$\approx$ °C/min		
UO ₂	200	1100	
MoS ₂	150	900	Karışımlarda
C (mangal kömürü)	100	1000	Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄
Fe ₃ O ₄	20	500/1000	oranına bağlı
FeS ₂	20	500	muhtemelen >20 °C/s
CuCl	20	450	
MnO ₂	-	-	
b) Aktif malzemeler	$\approx$ °C/min		
Ni ₂ O ₃	400	1300	Şiddetli
Co ₂ O ₃	300	900	Şiddetli
CuO	200	800	
Fe ₂ O ₃	170	1000	
FeS	135	800	
CuS	120	600	
c)Zor ısınan malzemeler	$\approx$ °C/min		
Al ₂ O ₃	80	1900	
PbO	70	900	
MgO	33	1300	
ZnO	25	1100	
MoO ₃	15	750	
d)Aktif olmayanlar	$\approx$ °C/min		
CaO	5	200	
CaCO ₃	5	130	
SiO ₂	2-5	70	

Test sonuçları 2 guruba ayrılmıştır: (1) ısı yok yada çok az ısı üretilmiş ve mineral özellikleri gerçekte değişmeden kalmıştır ve (2) ısı üretilmiştir, mineraller ya sıcaklığa rağmen stabil kalmış ya da farklı ürünlere hızlıca dönüşmüşlerdir[7].

Tablo 2.8: Mikrodalga ısıma için saydam mineraller (2450 MHz, 150 W, 5 dk maruz kalma)[2-5].

Mineral Sınıfı	Mineraller/Bileşikler
Karbonatlar	Aragonit, kalsit, dolomit, siderit
Jarosit tipi bileşikler	Argentojarosit, sentetik natrojarosit (çinko tesis atıkları, Kidd creek Mines), sentetik plumbojarosit(çinko tesis atıkları, Cominco)
Silikatler	Muskovit, potasyum, feldspat, kuvars, titan, zirkon, anortit, allanite, almandine, gadolinite
Sülfatlar	Barit, alçıtaşı
Diğerleri	Monazite, sfalerit (düşük –Fe), stibnit, fergusonite

Tablo 2.9: Oksitler ve Uranyum mineralleri üzerinde yapılan mikrodalga ısıtma deney sonuçları(2450 MHz frekans ve 3-5 dk Maruz kalma süresi)[2-5]

Mineral	Güç (W)	Isınmaya Karşı Tepkisi	Ürün Oluşumu
Allanite	>150	Isınmaz	Değişim yok; allanit
Kassiterit	40	Hızlı ısınır	Değişim yok; kassiterit
Fergusonit	>150	Isınmaz	Değişim yok; Fergusonit
Hematit	50	Hızlı ısınır; yüksek sıcaklıklarda ark meydana gelir	Değişim yok; Hematit
Manyetit	30	Hızlı ısınır	Değişim yok; Manyetit
Monazite	>150	Isınmaz	Değişim yok; Monazit
Pitblend (90 vol.%); klorit, galen ve kalsit içerir	50	Hızlı ısınır	Bazıları UO ₂ , U ₃ O ₈ , ThO ₂ ve Fe-Al-Ca-SiO ₂ camına ergir, diğerleri değişmez

Test sonuçları, pek çok silikatlar, karbonatlar, sülfatlar, bazı oksitler ve sülfatların Tablo 2.8’de olduğu gibi birinci grup içerisinde girdiğini göstermektedir. Her iki sentetik ve doğal jarosit, bazı metal oksitler örneğin hematit, manyetit ve kassiterit gibi kolayca ısıtılabilen ve Tablo 2.9’da görüldüğü gibi 2. Grup içerisinde yer almaktadır[2-5].

Tablo 2.10: Cevher mineralleri üzerinde mikrodalga ısıtmanın sonuçları, (2450 MHz, 3-5 dk maruz kalma)[2-5].

Mineral	Güç (W)	Isınma Davranışı	Ürün Oluşumu
Arsenoprit	80	Isınır, bazıları kıvılcım saçar	S ve As gazları, bazıları ergir.
Bornite	20	Hızlıca ısınır	Bazıları bornit, kalkoprit ve digenite dönüşür;
Kalkoprit	15	Sülfür gazı çıkışı ile hızlıca ısınır	Cu-Fe sülfürler yada prit ve Cu-Fe sülfürler
Kovalline/Anilite (60% vol.%)	100	Isınması zordur, sülfür gazı çıkışı olur	(Cu, Fe) ₉ S ₅ bileşime sinterlenir
Galen	30	Ark yaparak hızlıca ısınır	Galene sinterlenir
Nikel/Kobalt (3 vol.%)	100	Zor ısınır	Bazıları ergir; pekçoğu etkilenmez
Prit	30	Hızlı ısınır, sülfür gazı çıkışı olur	Protit ve S gazları
Protit	50	Yüksek sıcaklıklarda ark yaparak hızlı ısınır	Bazıları ergir; pekçoğu etkilenmez
Sfalerit Zn:%58.9, Fe:%7.4, S:%33.7	100	Soğuk iken ısınması zordur	Wurtzite dönüşür
Sfalerit Zn:%67.1 Fe:%0.2 S:%32.7	>100	Isınmaz	Değişmez, sfalerit
Stibnit	>100	Isınmaz	Değişmez, stibnit
Tennantite (*)	100	Soğuk iken ısınması zordur	Kalkoprit; arsenik gazları yayılır
Tetrahedrit(**)	35	Kolay ısıtılır	
* (Cu 42.8, Ag 0.1, Fe 4.8, An 1.7, As 12.5, Sb 10.6, S 27.5%)(90 vol.% tennantite, 6% kalkoprit, 4% kuvars)			
** (Cu 24.9, Ag 18, Fe 1.9, Zn 4.8, Sb 25.6, As 1.3, S 23.4%)(85 vol. % tetrahedrit, 10 % kuvars, 5%prarjerit, galen, kalkoprit)			

Mikrodalga ısıtmada minerallerin davranışı onların kimyasal bileşimine bağlıdır. Örneğin sfaleritteki Zn için Fe yer değiştirmeleri yüksek demirli sfalerite yol açmakta ve bu minerali mikrodalgaya tepki verir hale getirmektedir. Bu test sonuçları, mikrodalga enerjinin mineral uygulamalarında ve metal kazanma proseslerinde uygulama alanı bulabileceğini göstermektedir.

Son yıllarda, A.B.D. Maden Dairesinde 2450 MHz ile birçok mineralin mikrodalga ısıtma sonuçları rapor edilmiştir. Tüm ısıtma testleri her grup için 25 gr öğütülmüş örnekler ile yapılmıştır. Örneklerin sıcaklıkları, K-tipi thermocouple ile tespit edilmiştir. Tablo 2.11’de yapılan bu testlerin sonuçları verilmiştir.

Tablo 2.11: Doğal minerallerin mikrodalga ısıtma altındaki etkileri^a[1-7]

Mineral	Kimyasal Bileşim	Sıcaklık °C	Zaman, dk	Mineral	Kimyasal Bileşim	Sıcaklık, °C	Zaman, dk
Albit	NaAlSi ₃ O ₈	82	7	Molibdenit	MoS ₂	192	7
Arizonit	Fe ₂ O ₃ .3TiO ₂	290	10	Orpiment	As ₂ S ₃	92	4,5
Kalkosit	Cu ₂ S	746	7	Ortoklaz	KaSi ₃ O ₈	67	7
Kalkopirit	CuFeS ₂	920	1	Pirit	FeS ₂	1019	6,76
Kromit	FeCr ₂ O ₄	155	7	Pirotit	FeS	886	1,75
Zinober	HgS	144	8	Kuvars	SiO ₂	79	7
Galen	PbS	956	7	Sfalerit	ZnS	87	7
Hematit	Fe ₂ O ₃	182	7	Tetrahedrit	Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	151	7
Magnetit	Fe ₃ O ₄	1258	2,75	Zirkon	ZrSiO ₄	52	7
Mermer	CaCO ₃	74	4,25				

a: belirlenen zamanlar içinde kayıt edilen maksimum sıcaklık

Tablolar incelendiğinde metal tozları ve bazı ağır metal tuzlarının da aynı zamanda iyi ısıtıldığını görmekteyiz. Gang mineralleri olarak sayılan örneğin kuvars, kalsit ve feldspat bunların ise ısıtılamadığını görüyoruz. Bu çalışma aynı zamanda, mikrodalga transarent yapı içindeki cevher minerallerinin hızlı ısıtılmasının, mineral fazları boyunca mikro çatlaklar yaratmak için yeterli büyüklükte termal gerilim ürettiğini de ortaya çıkarmıştır. Chunpeng ve diğerleri (1990), pek çok oksit, sülfür ve karbonatlı minerallere mikrodalga ile ısıtma testleri yapmışlardır. Test sonuçları Tablo 2.12’de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde oksitlerin büyük çoğunluğunun ve sülfür minerallerinin iyi ısıtıldığı ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2.12: Mikrodalga ısıtmanın değişik minerallere etkisi (500 W, 2450 MHz)[7-18]

Mineraller	Kimyasal Bileşim	Zman, dk	Sıcaklık, °C
Jamosit	$Pb_2Sb_2S_5ZnS$	2	>850
Titanomagnetit	$xTiO_2 \cdot yFe_3O_4$	4	>1000
Galen	PbS	4	>650
Kalkoprit	$CuFeS_2$	4	>400
Pentlandit	$(FeNi)_9-xS_8$	4	>440
Nikel pirotit	$(FeNi)_4-xS$	4	>800
Cu-Co sülfür konsan.	$xCu_2S \cdot yCoS$	4	>800
Sfalerit	ZnS	4	>160
Molibdenit	MoS_2	4	>510
Stibnit	Sb_2S_3	4	oda sıcaklığı
Pirotit	FeS	4	>380
Pirit	FeS_2	6,75	1019
Bornit	Cu_3FeS_4	4	>700
Hematit	Fe_2O_3	4	>980
Manyetit	Fe_3O_4	4	>700
Limonit	$mFeO_2 \cdot nH_2O$	4	>130
Kasiderit	SnO_2	4	>900
Kobalthidrat	$CoO \cdot nH_2O$	4	>800
Kurşun molibdenit	$PbMoO_4$	4	>150
İlmenit	$FeTiO_4$	4	>1030
Rutil	TiO_2	4	Oda sıcaklığı
Kurşun karbonat	$PbCO_3$	4	>180
Simitsonit	$ZnCO_3$	4	>48
Siderit	$FeCO_3$	4	>160
Serpantin	$Mg(Si_4O_{10})(OH)_3$	4	>200
Melakonite	$(Cu_2, Al_3)H_2-x(Si_2O_3)(OH)_4$	4	>150
Antimon oksit	Sb_2O_3	4	>150

A.B.D. Maden Dairesi (U.S. Bureau of Mines) aynı zamanda pek çok kimyasal bileşik ve minerallerin mikrodalga enerjisine maruz kalma zamanının bir sabit periyodu için giriş mikrodalga gücünün fonksiyonu olarak mikrodalga ısıtma testlerinden bahsetmiştir. Tablo 2.13’de yapılan testlerde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Düşük kayıplı malzemeler (SiO_2 , CaCO_3) hariç (ki bunlar her güç seviyesinde iyi ısıtılamamışlardır) yüksek kayıplı malzemeler (PbS , Fe_3O_4) tüm güç düzeylerinde kolayca ısıtılabilmişlerdir ve giriş güç seviyesi artışına bağlı olarak minerallerin ısıtma oranının da arttığı ortaya çıkmıştır [7].

Tablo 2.13: Farklı mikrodalga güç seviyelerinde bazı kimyasal ve minerallerin ısınma oranları[7]

Kimyasal	Örnek	500 W		1000 W		1500 W		2000 W	
Bileşim	Ağırlığı, g	Sıcaklık °C	Zaman dk	Sıcaklık °C	Zaman dk	Sıcaklık °C	Zaman dk	Sıcaklık °C	Zaman dk
$\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$	15	385	7	463	7	498	7	547	7
CaCl_2	17	35	7	43	7	53	7	58	7
CaCO_3	10	32	7	42	7	51	7	55	7
CuCl	25	425	3 ^b	400	1 ^b	400	0,75 ^b	462	0,5 ^b
CuFeS_2	25	908	0,75 ^c	930	0,33 ^d	>1500	0,25 ^e	>1200	0,13 ^f
CuO	25	1083	1,5 ^b	1088	0,25 ^b	1088	0,5 ^b	>1200	0,25 ^e
Cr_2O_3	20	84	7	>1200	4 ^b	>1250	2,5 ^b	>1200	2 ^b
FeCr_2O_4	30	110	7	>1200	6,25 ^e	>1200	3,25 ^e	>1200	2 ^e
Fe_3O_4	25	1118	7	1144	3,5 ^d	1123	3 ^d	905	1 ^d
FeS_2	20	698	7	800	7	700	0,75 ^d	375	0,17 ^d
PbS	50	984	0,5 ^d	992	0,4 ^d	F	-	F	-
SiO_2	25	33	7	44	7	55	7	73	7
TiO_2	10	67	7	109	7	150	7	228	7
ZnO	9,5	87	7	128	7	184	7	301	5,75 ^e
ZnS	30	139	7	236	7	>1200	6 ^e	>1200	3,75 ^e

^a:belirlenen zamanda maksimum sıcaklığa ulaşmış

^b:örnek ergidiğinden test sona ermiştir

^c:belirlenen zamanda sıcaklık düşmeye başladığından test sona ermiştir

^d:örnek ark yaptığından test sona ermiştir

^e:sıcaklık ısı ölçerin sınırları altına gerilediğinden test sona ermiştir

^f:düşük güçlerde hızlı ısınmadan dolayı test sona ermiştir

Standish ve diğeri [90] tane boyutunun granüle malzemelerin ısıtılmasında önemli olduğunu, ancak gerek şart olmadığını rapor etmişlerdir. Granüle alümina ve manyetitin mikrodalga ısıtılmasında ince tane boyutlu Al_2O_3 ün iri tane boyutlu Al_2O_3 e göre daha hızlı ısındığını oysa iri tane boyutlu Fe_3O_4 ün ince tane boyutlu Fe_3O_4 e göre daha hızlı ısıtıldığını gözlemlemişlerdir[7].

2.14. MİKRODALGA ÖN İŞLEMLİ CEVHER ÖĞÜTÜLMESİ

Cevher hazırlama endüstrisinde boyut küçültme işlemleri son derece büyük bir enerji yoğun işlem olup, bu senede yüzlerce megawattlık bir büyüklüğe ulaşmaktadır. Boyut küçültmedeki önemli gelişmelerden pek çoğu, yüksek işletme maliyetlerini azaltmayı amaçlamıştır[158]. Teoride ancak verilen enerjinin %1 kadarı yeni bir yüzey oluşturmak için kullanılabilir. Geri kalan enerji; ses, ısı, çarpışma vb. gibi dağılmaktadır. Tablo 2.14’de bir bilyalı değirmendeki enerji tüketim dağılımı verilmiştir[5-7-28-56-57-74-75-76].

Tablo 2.14: Bir bilyalı değirmendeki enerji tüketiminin dağılımı[74]

Enerjinin Tüketildiği Yer	Tüketilen enerji içindeki %’si
Cıvata sürtünmesi(Bolt friction)	4,3
Dişli kayıpları (Gear losses)	8,0
Tamburdan kaynaklanan ısı kaybı	6,4
Hava tarafından absorbe edilen ısı	32
Ürün küçültme sırasında absorbe edilen ısı	48,6
Boyut küçültme için gerekli enerji	0,7

Pek çok mineral doğada saf olarak bulunmaz, ancak değerli ve değersiz minerallerin bir arada olduğu karışım şeklindedir. Her bir mineralin sahip olduğu farklı dielektrik özellikler nedeniyle malzemenin ısıtılması sırasında da farklı davranışlar göstermektedirler. Tane arayüzeyleri boyunca farklı gerilimler oluşmaktadır[6-30]

Isıl destekli serbestleşme(boyut küçültme), öğütme için gerekli olan enerji ihtiyacını azaltmak ve mineral serbestleşmesini artırarak uygun cevherlerdeki minerallerin birbirinden ayrılmasını geliştirmek için ekonomik bir yöntem olarak mikrodalga ön ısıtma önerilmektedir. Bunun yanında değirmen kapasitesinin arttırılabildiği, ton cevher başına aşınmanın azaldığı, değirmen ürün boyutlarının çok daha iyi kontrol edilebildiği, ince şlam üretiminin azaltılabildiği gibi faydaları da rapor edilmektedir[11-37-56-77-78-79-80-81-82-83].

Güngör ve Atalay [28-37] Ülkemizdeki Kef kromit cevheri ve farklı kimyasal bileşimdeki üç bakır cevheri üzerinde mikrodalga destekli öğütülebilirlik çalışmaları yapmışlardır. Bu çalışmalarda mikrodalga ıstmanın cevher üzerindeki etkilerini görmek için orijinal ve ısı uygulanmış örneklerin iş indeksi, kırılma oranı ve kırılma dağılım fonksiyonlarını araştırılmışlardır. Kef kromit cevheri ve bakır cevherleri üzerinde yaptıkları bu çalışmalarda mikrodalga ön uygulamanın sınırlı bir etki yaptığını, tespit etmişlerdir[28-37].

Walkiewicz ve diğerleri[84] absorblama özelliği olmayan gang yapıları içinde mikrodalga enerji absorblayan mineraller içeren cevherlerin hızlı ısıtılmasının termal gerilimler ürettiğini göstermişlerdir. Bu termal gerilim mineral tane sınırları boyunca mikro çatlaklar meydana getirmiştir. Sonuç olarak, bir cevher örneği öğütme için çok uygun hale gelmektedir. Yazarlara göre öğütme işlemi, cevher hazırlama işlemleri içerisinde kullanılan enerjinin %50-70'ini tüketmektedir. Bundan başka konvansiyonel öğütme proseslerinin enerji verimliliği yaklaşık olarak %1 dir. Bu çalışmada demir cevherinin mikrodalga ön ısıtılması ile öğütme veriminin %9,9' dan %23,9' a kadar artırılabilirdi belirtilmiştir. Bununla birlikte bu verim artışı mikrodalga ön ısıtma işleminin gerektirdiği enerji tüketimini karşılamak için yeterli bulunmamıştır[84].

Wang ve diğ. [10] kireçtaşı, dolomit, kuvars ve bakır cevherleri üzerinde mikrodalga ön uygulamanın öğütülebilirlik karakteristiklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında tane boyutunun önemli etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Kireçtaşı ve kuvarsın iri tane boyutlarında bünyelerinde oluşan mikroçatlakların değirmende öğütme sırasında faydalı olduğunu belirtmişlerdir[10].

Özbayoğlu ve Depci [38], mikrodalga enerjinin kömürün öğütülebilirliği üzerindeki etkilerini Hardgrove öğütülebilirlik indekslerini hesaplayarak incelemiş ve farklı tane boyutlarına, 0,17 ile 0,9 kW arasında 5 farklı mikrodalga güç ve 15 ile 60 sn arasında farklı sürelerde uyguladıkları testlerde öğütülebilirliğin artırılabilirdiğini belirtmişlerdir[38].

Kingman ve diğ.[19] farklı mineralojilere sahip 4 farklı cevher üzerinde mikrodalga enerjinin cevherlerin öğütülebilirliğine olan etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde ilmenit cevheri, masif sülfid cevheri, yüksek refrakter altın cevheri ve karbonatit cevheri kullanılmıştır. Örneklerin tamamı 22,5 mm altına kırıldıktan sonra tane boyut guruplarına ayrılarak mikrodalga ile ve mikrodalgasız olarak öğütme işlemine tabi tutulmuş, iş indeksleri tesbit edilerek elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Uygulanan 2,6 kW mikrodalga enerjinin ilmenit ve karbonatit cevherlerinin iş indekslerini büyük oranda azalttığı, masif sülfür cevherinin de mikrodalga enerjiye maruz kalma zamanı arttıkça iş indeksinde büyük düşme olduğu tesbit edilmiştir. Refrakter altın cevheri üzerinde ise önemli bir etki tespit edilememiştir[19]

Kömürle çalışan termik santrallarda pülverize kömür üretimi oldukça pahalı ve enerji yoğun bir prosestir. Kömürün öğünülebilirliğinde ısı uygulamasının etkisini belirlemek için yapılan bir çalışmada 3 farklı yöntem denenmiş ve birbiri ile mukayese edilmiştir[107]. İlk olarak 650 W ve 2450 MHz frekanslı bir mikrodalga fırında daha sonra 1,5 kW ve 2450 MHz frekanslı bir mikrodalga fırında son olarak da konvansiyonel muffle bir fırında kömür örnekleri ısı ön işleme tabi tutulmuşlardır. Konvansiyonel ısıtma ve mikrodalga ısıtma işlemlerinden elde edilen veriler karşılaştırıldığında mikrodalga ısıtmanın kömürün kırılabilirliğini konvansiyonel ısıtmaya göre az da olsa bir miktar arttırdığı tespit edilmiştir[85]

2.15. METAL OKSİTLERİN MİKRODALGA ÖN İŞLEMLİ KARBOTERMİK REDÜKSİYONU

Ağır metallerin ve karbonların çok geniş bir bölümü, örneğin odun kömürü ve kok kömürü mikrodalga ısıtmaya yanıt vermiştir. Bu yüzden metal oksitlerin mikrodalga ön

işlemleri karbotermik redüksiyonu mümkün olmaktadır. Şayet metal oksit düşük kayıplı ise (mikrodalga enerji için zayıf alıcı) daha sonra eklenen karbon mikrodalga ısıtmanın hızlanmasında rol oynar. Değişik araştırmacılar; karbon ile karıştırılmış demir oksitlerin (hematit, manyetit) metalik demire indirgenebildiklerini göstermişlerdir [6-7-85].

Konvansiyonel ve mikrodalga redüksiyonu karşılaştırmak için, Standish ve diğerleri, hematit cevher tozları, kok kömürü ve kireç tozlarının karışımının oluşturduğu örnek üzerinde redüksiyon testleri yapmışlardır. Herbir karışım örneği; elektrikle ısıtılmış bir muffle fırında 1000 °C da ve 2450 MHz ve 1,3 kW gücündeki bir mikrodalga fırında ısıtılmıştır. Örnek sıcaklıkları, örnek içerisine yerleştirilen bir thermocouple ile ölçülmüştür[6-7-87]. Elde edilen verilerden mikrodalga ısıtma oranının, konvansiyonel ısıtma oranına göre daha büyük olduğunu tespit edilmiştir. Bu işlem sonucunda bazı hal değişimleri gözlenmiş ve bunlar ısıtma oranını değiştirmişlerdir. Standish ve diğerleri (1990-1991) mikrodalga redüksiyon prosesinin, konvansiyonel prosese göre %15-50 arasında yatırım ve işletme maliyetlerinde bir tasarruf sağlandığının sonucuna varmışlardır[7].

Chunpeng vd. [7] de aynı zamanda; titanomanyetit konsantrelerinin mikrodalga destekli karbotermik redüksiyonunu incelemişlerdir. Linyit tozu ve CaCO₃ ile karıştırılmış ve toz haline getirilmiş titanomanyetit konsantresi 2450 MHz'de ve 500 W mikrodalga gücü ile ısıtılmıştır. Bu sonuçlar; konvansiyonel ısıtma test sonuçları ile karşılaştırıldığında mikrodalga ısıtma ile metal oksit redüksiyon oranının konvansiyonel ısıtmaya göre daha hızlı olduğu göstermiştir [7].

2.16. MİKRODALGAYA BAĞLI KURUTMA VE ANHİDRASYON

Mikrodalga enerji, pek çok malzeme ve ürünün örneğin, tarımsal, kimyasal ve yiyecek ürünleri, tekstil, kağıt, kereste, seramik, mineraller, çimento tozu ve kömür gibi pek çok ürünün kurutulmasında geniş uygulama alanı bulmaktadır[7-25-26-88-89-90-91-92-93-94-95-96-97-98-99-100-101-102-103-104].

Genel olarak kurutma; fiziksel olarak absorbe olmuş solventlerin örneğin su, asit yada yüksek buhar basınçlı organik maddelerin (örneğin alkol, aseton, eter, aromatikler vs.) bünnyeden uzaklaştırılması olarak tarif edilir[8-105].

Kurutma, üretim prosesinin çok önemli bir parçasını oluşturmakta ve bazı hallerde üretimin hız veya süresini tayin edebilmektedir. Örneğin seramik endüstrisinde 10-14 günlük kurutma süreleri normal olarak kabul edilebilmektedir. Mikrodalga kurutma bu süreyi kısaltabileceği gibi ambar kapasitelerini de küçülterek ürünlerin teslim zamanlarını kısaltmada önemli bir rol oynayabilmektedir. Yalnız bu rol mikrodalga teknolojisinin fiziksel yönleri bilinerek yapılabilir yani elektromanyetik dalgaların yayılma ve karakteristikleri bilinmek zorundadır[52].

Kocakuşak ve diğ. [25-26-129], farklı zamanlarda yaptıkları bir dizi çalışmada; mikrodalga ısıtma sistemi ile boraks penta ve deka hidratin susuzlandırma çalışmalarını 650 W gücünde ve 2450 MHz frekansında bir mikrodalga fırın ile yürütmüşlerdir. Bu çalışma ile %97,5 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ içerikli susuz boraks üretimi mümkün olmuştur. Ayrıca elde edilen tüm mikrodalga ısıtma ürünleri konvansiyonel ısıtma sistemlerine nazaran daha hızlı ve daha temiz olarak elde edilmiştir. Bir diğer çalışmalarında borik asitten %98 oranında B_2O_3 içeren saf bor oksit üretmişlerdir [14-15-128-106].

Van der Berg ve diğ. [107] endüstriyel amaçlar için yaygın olarak kullanılan 2,45 GHz ve 3,65 GHz frekanslarında fosfatın kurutulması ile ilgili çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmalar sonucunda %8 oranında nem içeren fosfat cevherini endüstriyel kabul edilebilir seviye olan %1 nem içeriğine indirmişlerdir. Bu çalışmada aynı zamanda konvansiyonel kurutmaya nazaran yaklaşık %25'e yakın bir enerji tasarrufu olduğunu da belirtmişlerdir[107]

Özalp ve diğ. [48], sodyum sülfat dekahidratın konvansiyonel ve mikrodalga enerji ile kurutulması konusunda çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalardan kurutma zamanı açısından mikrodalga enerjinin konvansiyonel yöntemle nazaran çok daha kısa olduğu tespit edilmiş, mikrodalga güç seviyesi arttıkça sodyum sülfat dekahidratın kuruma zamanının önemli oranda azaldığını belirtmişlerdir[48].

Eymir ve Okur [108], farklı tane boyutlara sahip üleksit mineralinin 2450 MHz frekansta, 150, 300, 450 ve 600 W mikrodalga güç seviyelerinde dehidrasyon deneylerini yapmışlardır. Mikrodalga ile ilgili deneylere başlamadan önce üleksit örneklerinden kil gibi safsızlıklar temizlenmiştir. Yapılan deneylerde tane boyutu küçüldükçe ve mikrodalga güç seviyesi büyüdükçe malzemenin sıcaklığının arttığını tespit etmişlerdir[108].

Su molekülünün atomları arasındaki açının polar olması sayesinde, suyu mikrodalga kullanarak ısıtmak kolaydır. Polar moleküller yüksek frekanslı çapraz alanlarda rotasyon yaparlar, neticede moleküller birbirleriyle temas ederler, böylece elektromanyetik enerjiyi ısıya çevirirler, her molekül ısı ortaya çıkardıkça, mikrodalga, kütle içersinde yeterince derine nüfuz eder ve bütün kütle ısınır. Bu, ısının maddeye sadece yüzeyinden geçerek nüfuz ettiği konvansiyonel ısıtmaya karşı önemli bir avantajdır[8].

Anhidrasyon; maddedeki kimyasal bağlı suyun uzaklaştırılması olarak tarif edilir.

Genel olarak, solventlerin büyük bir kısmı mikrodalga enerji ile kolayca ısıtılabilir. Solventlerin kaybolmasıyla ısıtılacak olan malzemenin dielektrik kayıp faktörünün genellikle azaldığı gözlenmiştir (Schiffmann 1987). Yazarlar mikrodalga ısıtmanın hidrate olmuş magnezyum klorürden ($MgCl_2 \cdot 7H_2O$) suyu uzaklaştırabileceğini ve götitin ($O=Fe-OH$), hematite (Fe_2O_3) dönüşebileceğini belirtmişlerdir[7].

2.17. MİKRODALGA DESTEKLİ MİNERAL LİÇİ

Analitik kimyacılar, kimyasal analizlerde, metallerin, minerallerin ve değişik kimyasal ürünlerin çözülmesi için rutin olarak mikrodalga ısıtma cihazları kullanmışlardır. Daha önce belirtildiği üzere mikrodalga ısıtma; konvansiyonel ısıtmaya göre malzeme seçimli, daha hızlı ısıtma oranı ve daha hızlı çözünme oranı vermektedir[7-32-109].

Kruesi ve Frahm (1982) ve Kruesi ve Kruesi (1986), nikel oksitler, kobalt ve demir içeren lateritik cevherlerin mikrodalga destekli liçi üzerinde çalışmışlardır. Bu mineral bileşiklerindeki metaller 30 dk süreyle 80 °C'deki su içerisinde liç edilmiş ve bunu takiben cevher karışımı ve amonyum klorid mikrodalga fırında (1200 W, 2450 MHz, N₂ atmosferinde) 4-5 dk maruz bırakılarak kloridleri haline dönüştürülmüştür. Bu işlemde nikel ve kobalt kazanımları sırasıyla %70 ve %85 olmuştur ve bu sonuçların konvansiyonel bir döner fırında elde edilebilmesi için 300 °C fırın sıcaklığı ve 2 saatlik bir kavurma işlemi süresi gerekmektedir [7-32-110].

Son yıllarda, Peng ve Liu [7] asidik ferrik klorit ile sfaleritin liçinde mikrodalga enerji uygulamışlardır. Değişik liç parametreleri, örneğin sıcaklık, tane boyutu ve ferrik klorit konsantrasyonu çalışılmıştır. Test sonuçları, çinkonun liç oranının, her iki mikrodalga ve konvansiyonel ısıtma sistemlerinde sıcaklıkla arttığını göstermiştir. 95 °C de, 60 dk mikrodalga ısıtma ile 0,1 M HCl , 1,0 M FeCl₂ liç koşullarında çinko kazanımının %90 olduğu rapor edilmiştir. Benzer koşullarda, konvansiyonel liç işlemi ile yalnızca %50 çinko kazanımı yapılabilmektedir[7-32-109-111].

Weian [7], bakır sülfür konsantrelerinin mikrodalga destekli asidik ferrik klorid liçi üzerinde çalışmıştır. Bu konsantre içindeki ana bakır mineralleri kalkosit (Cu₂S) ve kalkopirit (CuFeS₂) dir. Liç sıvısı doğrudan, değişik sürelerde mikrodalga (700 W 2450 MHz) ısıtmaya tabi tutulmuştur. 40-45 dk mikrodalga ısıtmadan sonra bakır kazanımı %99'a ulaşmıştır. Buna karşın aynı değerde bir bakır kazanımı için konvansiyonel ısıtmada 2 saat gerekli olmaktadır. Yazar mikrodalga destekli liç işleminin bakır için hızlı bir çözünme oranı sağladığını ve bakır sülfür konsantrelerinin liçi sırasında mineral yüzeylerinde meydana gelen elementer sülfürün zararlı etkisini önlediğini belirtmiştir[7-32-112].

Antonucci ve Correa [7], Kalkoprit konsantrelerinden (30,1-30,3% Cu) bakır kazanımı konusunda, pH 1,6 da ve 60 °C de su liçini takiben, konsantre ve sülfirik asit karışım pastasının mikrodalga ısıtması ile (2450 MHz ;laboratuvar deneyleri için, ve 915 MHz; yarı pilot çaplı testler için) sülfatlaşma reaksiyonlarını incelemişlerdir. Yarı pilot çaplı testler 35 litre kapasiteli teflondan yapılmış silindirik döner reaktörde yapılmıştır. Reaktörün üzerinde bir açıklık vardır ki, şarj (konsantre ve H₂SO₄) buradan

beslenmektedir ve aynı zamanda gaz ve elementer sülfür için çıkış yeri olarak servis yapmaktadır. Test sonuçları yüksek bakır kazanımlarının yüksek sülfirik asit dozajlarında olacağını göstermiştir. Yazarlar %96'dan büyük bakır kazanımlarının, 1,8 kg asit/kg kons. Karışımının mikrodalga ısıtması ile elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Bu proses elementer sülfür ve kuprik sülfat vermektedir[7-32-34].

Harahsheh ve diğ. [34], mikrodalga uygulamasının kalkopirit liçi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalardan mikrodalga ısıtmanın reaksiyon kinetiklerine pozitif bir etki yaptığını belirlemişlerdir[34].

2.18. MİKRODALGAYA BAĞLI KAVURMA ve SÜLFÜR KONSANTRELERİNİN ERGİTİLMESİ

Chunpeng ve Jinhui [7]; oksijen miktarının kontrolü altında mikrodalga enerji ile nikelli pirotitin kavurmasına ait test sonuçlarını rapor etmişlerdir. Pirotit içindeki sülfürün %90 dan fazlası elementer sülfüre dönüştürülmüş, demir ve nikel Fe_3O_4 , NiO , NiFe_2O_4 ve FeSiO_4 e oksitlenmiştir. Argon atmosferinde PbS ve PbO karışımlarının mikrodalga destekli (650 W, 2450 MHz) ergitilmesinin test sonuçları; PbS'nin PbO'ye göre daha hızlı ısıtma oranına sahip olduğunu göstermiştir. İlave olarak, konvansiyonel ısıtmaya nazaran mikrodalga ısıtmada buharlaşmadan dolayı metal kayıplarının daha az olduğu belirtilmiştir[7].

Huang ve Rowson [113] pirit ve markazit üzerinde yaptıkları mikrodalgaya bağlı ısıtma testlerinde; mikrodalga güç seviyesi, malzemenin kristal yapısı ve tane boyutunun dielektrik ısıtma oranını etkilediğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte yapılan mikroskobik ve XRD analizleri; nitrojen atmosferi ortamında markazit ve piritin dielektrik ısıtma ile bozunarak protit'e (Fe_{1-x}S) ve elementer S'e dönüştüğünü göstermiştir[113].

2.19. REFRAKTER TİP ALTIN KONSANTRELERİNİN MİKRODALGA DESTEKLİ ÖN UYGULAMASI

Altın alkali siyanür liçi ile kolayca kazanılamadığında refrakter cevher olarak düşünülür. Refrakter altınların büyük bir bölümü; pirit (FeS_2), arsenopirit (FeAsS) ve pirotin (FeS) gibi sülfidik mineraller içinde oluşur. Genellikle refrakter altın konsantreleri yada cevherlerine kavurma ile ön uygulama yapılır. O_2 -basınç liçi ya da bakteri liçi, alkali siyanür liçi ile altın kazanımına uygun kılmaktadır[7]

Sülfidik mineraller mikrodalga ile kolayca ısıtılabilirdiği için bu tip refrakter altın cevherlerinin mikrodalga enerji ile ön ısıtılması mümkün olmaktadır. Haque (1987 a,b) tipik arsenopiritik refrakter altın konsantrelerinin hava ortamında laboratuvar ölçekli mikrodalga ön uygulama testlerini yapmıştır. Demir 550°C 'de hematite (Fe_2O_3) oksitlenirken, %80 den fazla As ve S, As_2O_3 ve SO_2 olarak buharlaşmıştır. Alkali siyanür liçi ile %98 Au ve %60 Ag kazanımı gerçekleşmiştir[7].

As_2O_3 , SO_2 oluşumundan kaçınmak için araştırmacılar mikrodalga kalsinasyon testlerini ağız kapatılmış ve nitrojen atmosferinde gerçekleştirmişlerdir. Ana ürünler FeS, arsenik sülfür (As_2S_3) ve sülfür (S) olmuştur. İlave olarak çalışmayı yapan, mikrodalga ısıtma testlerini bu konsantre ve NaOH karışımları üzerinde yürütmüştür. Bu karışımların mikrodalga ısıtılması sırasında SO_2 ve As_2O_3 oluşumu gözlenmemiştir, bunun yerine suda çözülebilen ürünler örneğin; Na_3AsO_4 , Na_2SO_4 , FeSO_4 oluşmuştur. Mikrodalgaya maruz bırakılan katılar 75°C 'da su ile liç işlemine tabi tutulmuştur. Katı sıvı ayırımından sonra kalan tortu alkali siyanür liçine tabi tutulmuş ve %99 Au ve %79 Ag kazanımı gerçekleştirilmiştir. Refrakter tip altın cevherlerinin dışındaki altın cevherleri örneğin; karbonlu (carbonaceous) altın cevherleri ve bazı götütli altın artıkları ve diğerleri mikrodalga ısıtma ön uygulaması ile başarıyla uygulanabilmektedir. Günümüzde Kanada'da değişik tip refrakter altın konsantrelerine, cevher ve artıklarına pilot çaplı mikrodalga ön uygulama testleri yapılmaktadır [7].

2.20. MİKRODALGAYA BAĞLI AKTİF KARBON REJENERASYONU

Günümüzde altın cevheri üretim tesislerinin hemen hemen büyük bir bölümü, pülpde karbon yada liçte karbon operasyonlarında aktive edilmiş karbon kullanılmaktadır[114-115]. Altın siyanokomplekslerinin $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ adsorbsiyon ve desorbsiyonlarının herbir kademesinden sonra karbon yeniden kazanılmakta ve hazırlanmaktadır. Genellikle bu harcanan karbon yüksek sıcaklıklarda ($600-750\text{ }^{\circ}\text{C}$) içten ısıtılmış döner fırınlarda ısıtılmasını takiben bir mineral asit ile yıkanarak yeniden kazanılmaktadır[114-115-116].

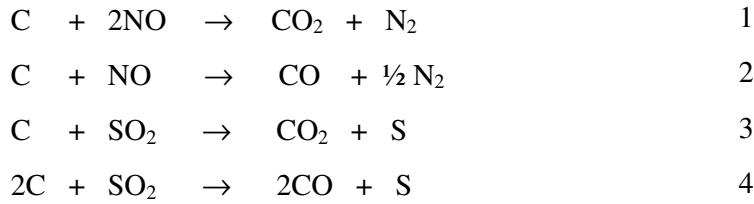
Mikrodalga ısıtma ile yüksek sıcaklıklarda ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) bu karbonun kolayca ısıtılabilceği belirtilmiştir[7-114]. Wyk ve diğ. (1998) 850 W mikrodalga güç seviyesinde ve 2,45 GHz mikrodalga frekansında yaptıkları rejenerasyon çalışmalarında endüstriyel normlarda aktive edilmiş karbon elde etmişler ve mikrodalga ısıtma ile karbon geri kazanımının uygunluğunu doğrulamışlardır. Sonradan yapılan pilot ölçekli karbon geri kazanımı testleri (915 MHz) konvansiyonel geri kazanım proseslerinden daha iyi olduğunu göstermiştir. Günümüzde Kanada’da bu teknoloji pazarlanmaktadır [114-117-118].

2.21. MİKRODALGA DESTEKLİ ATIK YÖNETİMİ

Üretim endüstrisi değişik oranlarda artık malzeme açığa çıkarmaktadır, bunların içerisinde maden öğütme tesisleri de girmektedir. Atığın bileşenleri ile ortaya çıkan tehlikeyi azaltmak için, teknolojiler atık üretiminin minimizasyonu ve güvenli işleme, taşıma, depolama, bozundurma, uzaklaştırma yada tehlikeli atıkların kontrolü için araştırmalar başlatmışlardır[6-7].

Günümüzde mikrodalga enerjisi gazların, sıvı ve katı atıkların çok geniş bir yelpazede yönetiminde önemli bir potansiyel olabileceğini göstermektedir. Madencilik işlemleri, asit üretme potansiyeli olan büyük hacimlerde katı atıklar üretmektedir. Sıvı atıklar; asit, toksik ağır metaller ve non-metaller, siyanür, amonyak, organik maddeler ve diğerleridir. Gaz atıklar; kükürt dioksit, hidrojen sülfür, amonyak ve azot oksitlerdir[7].

Cha [126] yaptığı laboratuvar ölçekli testlerde; SO₂ ve NO_x gazlarının, elementer azota kükürt ve karbon monoksit ve ayrıca karbon dioksit karışımları haline dönüştürmüştür. Prosesin ilk adımı; SO₂ ve/veya NO_x leri içeren gazın, toksik gazları absorblaması için aktive edilmiş karbon bulunan bir kolon içerisinden geçirilmesini kapsar. Yüklü karbon kolonu daha sonra mikrodalga ile ısıtılmakta ve sonuçta; CO, CO₂ ve N₂ atmosfere salınmaktadır. Kükürt spray odasında soğutularak satış için toplanmaktadır. Aşağıda bu reaksiyon kademeleri verilmiştir [126].



H₂S, ham petrol rafinasyonu sırasında üretilen çok toksik bir gazdır. Genellikle, hidrojen sülfür atık gaz akışı Claus prosesi ile muamele edilmektedir ki, bu hidrojen sülfürün, kükürt ve su olarak kısmi oksidasyonuna dayanmaktadır. Claus oksidasyon prosesi uygun oksidant karışımlarına gerek duymaktadır. Moskova'daki Kurchatov Enstitüsü mikrodalga plazma uygulayarak, hidrojen sülfürün, hidrojen ve kükürte bozunması için bir proses geliştirmiştir. Amerikan Argon National Laboratory (ANL); plazma-kimyasal atık muamele prosesi geliştirmiştir ki, bu; hidrojen sülfür atık gazının bir mikrodalga-plazma reaktörden geçirilerek hidrojen ve kükürte bozunmasını sağlamaktadır. ANL test sonuçları; her bir geçişte bozunma oranlarının %65-80 aralığında olduğunu belirtmektedir. İlk enerji ve ekonomik analiz verileri; "plasma-kimyasal atık muamele prosesinin yıllık enerji tasarrufunun 40-70 trilyon Btu yada rafine endüstrisine 500-1000 milyon dolar tasarruf sağlayacağını göstermektedir [6-7].

Çelik üretim fırınları, metalik tozlar üretmektedir. Elektrik ark fırınları (EAF) metallerin galvanizlenmesinde toz üretmektedir ki, bu toz yüksek oranda liç edilebilir kurşun (Pb), kadminyum (Cd), Krom (Cr) ve çinko (Zn) içerir. Bu toz çeşitleri, risklerine göre sınıflandırılmakta kontrol ve düzenlemek için öncelikli olarak ele alınmaktadır. Günümüzde; ABD'nin birleştirilmiş EAF toz üretimleri yılda 677 000 ton dur. Geçerli toz uygulama prosesleri, 40 000 ton/yıl ve üzerindeki ölçekteki uygulamalar varsa ekonomik olabilmektedir. Ghoshy and Pickles (1994); tipik elektrik

ark ocak toz karışımlarının öğütülmüş karbon ile değişik zaman aralıklarında mikrodalga enerjisi (900 W, 2450 MHz) ile ısıtılmasını çalışmışlardır. %90 üzerindeki çinko, çinko oksit olarak buharlaşmıştır ki, daha sonra reaksiyon tabla üzerinde yerleştirilmiş alimünyum plaka üzerinde yoğunlaşmış ve toplanmıştır[6-7].

Çelik üretimi sırasındaki cürufklar ağırlıkça %20 demir içermektedir. Fiziksel karakteristikleri modifiye etmek cüruftan demiri kazanmak için Hatton ve Pickles (1994) laboratuvar çaplı mikrodalga ısıtma testleri (1000 W, 2450 MHz) yapmışlardır. Çelik üretim cürufklarının karbon ya da manyetit ilave edilmeksizin ve edilip ısınma davranışlarını araştırmışlardır. Test sonuçları; her iki karbon ve manyetit ilavesi ile cürufun ısınma oranının arttığını göstermiştir. Karbon ile 1000 °C'da , manyetit ile 800 °C'de ve hiç ilave olmaksızın 650 °C'de karşılaştırılmıştır. Kazanılan demir miktarı, ısıtma zamanı ile artarak %90'lara ulaşmıştır. Mikrodalga ısıtma, cürufun fiziksel ve kimyasal özelliklerini bozmuştur[7].

2.22 CEVHERLERİN MİKRODALGA ÖN İŞLEMLİ MANYETİK YÖNTEM İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Kingman vd. (1999), massive Norwegian ilmenit cevherlerinin manyetik zenginleştirme olanaklarını araştırmıştır. Mikrodalga radyasyona maruz bırakılmış cevherler üzerinde yapılan manyetik ayırma deneylerinde radyasyona maruz kalmamış olanlara kıyasla yüksek tenörlü değerli mineral kazanımını gerçekleştirmişlerdir.

Can (2001), saf sülfür mineralleri üzerinde mikrodalga ısıtmanın etkisini araştırmıştır. Bu çalışmalarında mikrodalga güç seviyesi arttıkça pirit ve kalkopiritin manyetik özelliklerinin arttığı bunun yanı sıra galen ve sfaleritin ise manyetik özelliklerinde bir değişme olmadığını tespit etmiştir[109].

Uslu ve Atalay [17] çalışmalarında piritin mikrodalga ısıtma karakteristiklerini ve mikrodalga destekli manyetik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Kömürden pirit mineralinin uzaklaştırılmasında manyetik zenginleştirmenin performansı, piritin manyetik duyarlılığının arttırılması ile geliştirilebilmektedir. Pek çok çalışmada piritin

manyetik duyarlılığının ısı uygulaması ile arttığı belirtilmiştir. Ancak kömür içerisindeki piritin ısıtılmasındaki problem enerjinin piritin yanında ortamın ve kömüründe ısıtılması ile boşa harcanmasıdır. Seçimli bir ısıtma yöntemi olan mikrodalga ısıtma ile hem hızlı bir ısıtma gerçekleşirken hem de fırın içini ve kömürü ısıtmada harcanan enerjiden tasarruf edilmektedir[17-119].

2.23. CEVHERLERİN MİKRODALGA DESTEKLİ FLOTASYONU

Orumwense [160], mikrodalga ön uygulamanın saf sülfür mineralleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan deneylerde mikrodalga güç seviyesi ve deney süresi arttıkça pirit, kalkopirit ve galenin yüzebilirliğinin azaldığı buna karşın sfaleritin yüzebilirliğinin değişmediği tespit edilmiştir. Yapay mineral karışımları ve cevherlerinin mikrodalga ön uygulaması ile etkilenmediği görülmüştür. Bununla birlikte bunların flotasyon verimleri %3-5 oranında arttığı gözlenmiştir[160]

2.24. MİKRODALGA ÖN İŞLEMLİ KÖMÜR DESÜLFÜRİZASYONU

Literatürde mikrodalga enerji ile kömürün desülfürizasyonu konusunda pek çok araştırma mevcuttur [3-33-120-121-122-123-124-125-126-127-128-129-130].

Uslu [33], mikrodalga radyasyona maruz kalmış kömür numuneleri üzerinde yaptığı manyetik ayırma deneyleri ile toplam kükürt ve piritik kükürt içeriklerinde önemli oranda bir düşüş gerçekleştiğini tespit etmiştir[33].

Çeşitli boyutlardaki ön-temizlenmiş kömür mikrodalga fırında farklı sürelerde radyasyona maruz bırakılmış ve bu numuneler daha sonra manyetik ayırma işlemine tabi tutulmuştur. 850W ve 2,45 GHZ de ısıtılan piritin manyetik özelliğindeki artış, 2 Tesla manyetik alan şiddetinde önemli miktarda pirit uzaklaştırma için yeterli olmamış ama yine de manyetik özellik az miktarda artmış ve -0,15 mm tane boyutu için, manyetik ayırma ile ön-temizlenmiş kömürün toplam kükürt ve piritik kükürt içerikleri sırasıyla %32,82 ve %37,46 oranında düşürülmüştür. Çalışmanın devamında piritin

mikrodalga ısınma özelliğini arttırmak için ön-temizlenmiş kömüre mikrodalga emicilik özelliği fazla olan manyetit ilave edilerek yapılan aynı işlemlerden sonra toplam kükürt ve piritik kükürt sırasıyla %52,05 ve %58,20 oranında düşürülmüştür[33-131-132].

Sierra de Arcos (Teruel bölgesi,İspanya) kömürleri hidrojen ortamında yalıtılmış bir reaktör içerisinde HI ile reksiyona girerek 10 dk mikrodalga ısıtmaya maruz bırakılmak sureti ile piritik sülfürün %99'dan fazlası ve organik sülfüründe %64,7'si uzaklaştırılmıştır[121]

2.25. BOR MİNERALLERİ ÜZERİNDE YAPILAN MİKRODALGAYA BAĞLI ÇALIŞMALAR

Ülkemizde bor mineralleri üzerinde mikrodalga enerjisine bağlı çok sayıda araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların özellikle kimyasal madde kurutma ve kalsinasyon ile üretim konularında yoğunlaştığı dikkati çekmektedir[49].

Kocakuşak ve diğ.[133], borik asitten mikrodalga enerjisi ile bor oksit üretimi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada 2450 MHz ve 700 W gücü olan bir mikrodalga fırın kullanılmış ve borik asitten %98 verim ile bor oksit üretmişlerdir[133].

Kocakuşak ve diğ.[25], boraks pentahidrat, boraks dekahidrat ve çeşitli boraks hidratların mikrodalga enerji ile dehidrasyonu ve susuz boraks üretimi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 2450 MHz frekansta ve 650 W gücünde bir mikrodalga fırın kullanılmış ve 1 molden daha az kristal suyu içeren susuz boraks elde edilebilmiştir [25-106].

Kocakuşak ve diğ.[88], mikrodalga enerji desteğinde borik asitin dehidrasyonu ile bor oksit üretimi konusunda yaptıkları başka bir çalışmada ise 2450 MHz frekans ve 700 W gücünde bir fırın kullanmışlar ve 60 dakikadan daha kısa bir sürede %98 B₂O₃ içeren bor oksit üretimini gerçekleştirmişlerdir[88].

Kocakuşak ve diğ. [1995-1996-1998], tarafından yürütülen diğer çalışmalarda da; %5-10 nem içeren boraks pentahidratın mikrodalga enerjisi ile kurutulması incelenmiştir. 250 °C’de 20 dk mikrodalga enerjiye maruz kalma süresinde, %85 içerikli $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ toz formunda elde edilmiştir. Deney sonuçları konvansiyonel sistem ile de karşılaştırılmıştır ve mikrodalga kurutmanın konvansiyonel prosese göre çok daha ekonomik olduğu belirtilmiştir [26-99-134].

Eymir ve Okur [2005], üleksit mineralinin mikrodalga enerji ile dehidrasyonu üzerinde yaptıkları çalışmada Eskişehir Kırka bölgesinden aldıkları üleksit numunelerinin önce kil gibi safsızlıklarından temizlemiş ve daha sonra kırma ve öğütme ile 4 farklı boyut grubunda (-1180+850, -850+600, -600+425, -300+212 mikron) sınıflandırmışlardır. Yapılan deneyler ile 2450 MHz frekaslı ve maksimum 1000 W gücündeki bir fırında farklı güç seviyelerinin her bir boyut grubundaki üleksitin dehidrasyonu üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Mikrodalgaya bağlı elde edilen sonuçlar daha sonra konvansiyonel yöntem ile de karşılaştırılmış ve ısıtma mekanizması açısından mikrodalgaanın çok efektif olduğunu belirtilmiştir [108].

2.26 MİKRODALGA TEKNOLOJİSİNİN EKONOMİSİ

Mikrodalga kurutma sistemlerinin ekonomisi ilk yatırım ve işletme maliyetleri olarak iki kısma ayrılabilir. Tablo 2.15’de endüstriyel boyutlu bir mikrodalga kurutma sisteminde ilk yatırım ve işletme maliyetleri verilmiştir.

Uzaklaştırılacak olan su miktarı fazla ve mikrodalga sistem sadece suyun uzaklaştırılması için isteniyorsa, mikrodalga sistem için gerekli olan ilk yatırım maliyeti bu sistemi tercih konusunda sınırlayıcı olabilmektedir. Ancak, malzemede kalan nemi uzaklaştırmak için konvansiyonel sistem ile beraber mikrodalga enerji sistemi kullanıldığında yatırım maliyetlerinde oldukça azalma sağlamaktadır[48].

Tablo 2. 15: Bir mikrodalga kurutma sisteminde ilk yatırım ve işletme maliyetleri[48]

İlk Yatırım	Maliyet
Jeneratör (dalga klavuzu ve kontrol ünitesi içeriyor).....	\$4000-\$9000 / kW
Uygulayıcı	Jeneratörün %20'si
Soğutma sistemi (6kW)..... (Gerekli olan 350 kg Su/saat)	Jeneratörün %10'u
Güç iletimi.....	Jeneratörün %5'i
Montaj ve kontrol.....	Jeneratörün %2'si
İşletme	Maliyet
Elektrik enerjisi.....	\$0,1 /kWh
Tüp değişimi.....	\$0,06 /kWh
Tüp Maliyeti.....	\$3500
Tüp Ömrü.....	6000 saat
Bakım, yıllık.....	Maliyetin %2'si

2.27. BOR MİNERALLERİ

2.27.1 Genel Bilgi

Bor yer kabuğunda 3 ppm konsantrasyon oranı ile en yaygın bulunan 51. elementtir. Atom numarası 5, atom ağırlığı 10,8, ergime noktası 2300 °C ve özgül ağırlığı 2,0-2,5 g/cm³ dir. Bor, ülkemizin sahip olduğu en önemli madenlerden birisidir. Bazı alanlarda konsantre bor ürünleri kullanılabildiği gibi, genel olarak rafine bor bileşiklerine ve özel bor kimyasallarına dönüştürüldükten sonra geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Cam endüstrisinden sabun ve deterjanlara, gübre ve tarımsal ilaçlardan aleve dayanıklı malzemelere, yakıt pillerinden nükleer uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanı olan bor ürünleri günümüz teknolojisinde önemli bir yere sahiptir [137-161].

Bor mineralleri; bünyelerinde değişik oranlarda bor oksit (B₂O₃) içeren mineraller olup; ülkemizde yaygın olarak bulunan bor mineralleri; tinkal, kolemanit ve üleksit'dir. En yaygın bulunan bor mineralleri ve özellikleri Tablo 2.16'da verilmiştir.

Tablo 2.16: En yaygın bor mineralleri ve özellikleri[161]

Mineral	Kimyasal Bileşim	B ₂ O ₃ %	H ₂ O %	Kristal Yapı	Sertlik (Mohs)	Özgül Ağırlık	Suda Çözünürlük
Boraks (Tincal)	Na ₂ B ₄ O ₇ 10H ₂ O Na ₂ O 2B ₂ O ₃ 10H ₂ O	36,51	47,24	Monoklinik	2-2,5	1,711- 1,715	Çok Yüksek
Kolemanit (Borocalcit)	2CaO 3B ₂ O ₃ 5H ₂ O Ca ₂ B ₆ O ₁₁ 5H ₂ O Ca[B ₃ O ₄ (OH) ₃] H ₂ O	50,80	21,92	Monoklinik	4-5	2,42- 2,43	Çok Düşük
Uleksit (Boronatrocalcit)	Na ₂ O 2CaO 5B ₂ O ₃ 16H ₂ O NaCaB ₅ O ₉ 8H ₂ O NaCa[B ₅ O ₆ (OH) ₆] 5H ₂ O	42,95	35,57	Triklinik	2,5	1,955- 1,961	Orta
Kernit (Rasorit)	Na ₂ O 2B ₂ O ₃ 4H ₂ O Na ₂ B ₄ O ₇ 4H ₂ O Na ₂ [B ₄ O ₆ (OH) ₂] 3H ₂ O	50,95	26,37	Monoklinik	2,5-3.0	1,906	Yüksek
Probertit (Kramirit)	Na ₂ O 2CaO 5B ₂ O ₃ 10H ₂ O NaCaB ₅ O ₉ 5H ₂ O CaNa[B ₅ O ₇ (OH) ₄] 3H ₂ O	49,56	25,65	Monoklinik	3-3,5	2,13- 2,14	Düşük
Priceit (Pandermit)	4CaO 5B ₂ O ₃ 7H ₂ O Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ 7H ₂ O Ca ₂ [B ₅ O ₇ (OH) ₅] H ₂ O	49,83	18,06	Triklinik	3-3.5	2.41- 2.48	Düşük
Datolit (Gadolinit)	4CaO 2B ₂ O ₃ 4SiO ₂ 2H ₂ O Ca ₂ B ₂ Si ₂ O ₉ H ₂ O Ca ₄ [B ₄ (SiO ₄) ₄ (OH) ₄]	21,76	5,63	Monoklinik	5-6	2,97- 3,02	Düşük
Sassolit (Doğal borik asit)	B(OH) ₃ B ₂ O ₃ 3H ₂ O H ₃ BO ₃	56,29	43,71	Triklinik	1	1,48- 1,50	Çok Yüksek
Hydroboracit	CaOMgO 3B ₂ O ₃ 6H ₂ O CaMgB ₆ O ₁₁ 6H ₂ O CaMg[B ₃ O ₄ (OH) ₃] ₂ 3H ₂ O	50,53	26,16	Monoklinik	2-3	2,167- 2,173	Yüksek
Szaibelyit (Ascharit)	2MgO B ₂ O ₃ H ₂ O Mg ₂ B ₂ O ₅ H ₂ O Mg ₂ (OH)[B ₂ O ₄ (OH)]	41,38	10,71	Monoklinik	3-3,5	2,60- 2,76	
Boracit (Stassfurit)	5MgO MgCl ₂ 7B ₂ O ₃ Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl Mg ₃ [B ₃ O ₅] ₂ [BO ₃]Cl	62,15	-	Orthorhomb ik kubik >265°C	7-7,5	2,89- 2,87	
Tincalconit (Mohavit)	Na ₂ O 2B ₂ O ₃ 5H ₂ O Na ₂ B ₄ O ₇ 5H ₂ O Na ₂ [B ₄ O ₅ (OH) ₄] 3H ₂ O	47,80	30,93	Hexagonal rhombohedral	2,5	1,88- 1,91	

BORAKS (TİNKAL) ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$]

Renksiz ve saydam olmasına rağmen, bileşimindeki çeşitli safsızlıklar nedeniyle pembe, sarımsı, gri renklerde bulunabilir. Sertliği 2-2,5, özgül ağırlığı 1,7'dir. B_2O_3 içeriği %36,5'dir. Tinkal çabuk bozunarak suyunu kaybederek tinkalkonit'e dönüşebilir. Kille arakatkılı tinkalkonit ve üleksit ile birlikte bulunur. Türkiye'de Eskişehir-Kırka yatağında bulunmaktadır.

KERNİT ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$]

Renksiz, saydam beyaz, uzunlamasına bireysel iğne şeklinde küme kristaller halinde bulunur. Sertliği 3, özgül ağırlığı 1,95'dir. Atmosferik koşullarda tinkalkonit'e dönüşür. Soğuk suda yavaş çözünür. B_2O_3 içeriği % 51,0'dir. Kırka'da Na-borat kütlelerinin derin kısımlarında bulunur. Dünya'da ise Arjantin ve A.B.D.'de bulunur.

ÜLEKSİT $2(\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$ [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$]

Masif, karnabahar, lifsi ve sütun şeklinde bulunur. Sertliği 1, özgül ağırlığı 1,96'dır. Saf olanı beyaz olup gri renk tonlarında da bulunabilir, ipek parlaklığında olanları da vardır. Kolemanit, hidroborasit ve probertit ile birlikte bulunur. B_2O_3 içeriği %43,0'dir. Türkiye'de Kırka, Bigadiç ve Emet'te, dünyada ise Arjantin'de bulunmaktadır.

PROBERTİT $2(\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$]

Kirli beyaz, açık sarımsı renklerde olup ışınal ve lifsi şekilli kristaller şeklinde bulunur. Sertliği 3,5 özgül ağırlığı 2,14'dür. Kristal boyutları 5mm ile 5 cm arasında değişir, B_2O_3 içeriği % 49,6'dir. Kestelek yataklarında üleksitin yanında ikincil mineral olarak gözlenir. Ancak Emet'te uniform tabakalı birincil olarak, Doğanlar-İğdeköy bölgesinde kalın tabakalı olarak bulunur.

KOLEMANİT ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$) [$2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$]

Monoklinik sistemde kristallenir. Sertliği 4-4,5 özgül ağırlığı 2,42'dir. B_2O_3 içeriği % 50'dir. Suda yavaş, HCl'de hızlı çözünür. Bor bileşikleri içinde en yaygın olanıdır. Killer içinde cevher boşluklarında iri, parlak, saydam kristaller halinde bulunur. Türkiye'de Emet, Bigadiç, Kestelek yataklarında ve dünya'da A.B.D'de bulunur.

PANDERMİT ($\text{Ca}_2\text{B}_{10}\text{O}_{17} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) [$2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$]

Beyaz renkte ve yekpare olarak gözükmetedir. Sertliği 3, özgül ağırlığı 2,3'dür. Kireçtaşına benzemektedir. Sultançayı ve Bigadiç yataklarında gözlenmektedir. Zaman içinde kolemanit ve kalsite dönüşmektedir. B_2O_3 içeriği % 49,8'dir.

HİDROBORASİT ($\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) [$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$]

Bir merkezden ışınal ve iğne şeklindeki kristallerin rastgele yönlenmiş ve birbirini kesen kümeleri halinde bulunur. Lifsi bir dokuya sahiptir. B_2O_3 içeriği % 50,5'dir. Beyaz renkte, bazen içerisindeki safsızlıklara bağlı olarak sarı veya kırmızımsı renklere (arsenik içeriğine göre) ve kolemanit, üleksit, probertit, tunelit ile birlikte bulunur. Türkiye'de en çok Emet-Doğanlar-İğdeköy sahasında ve Kestelek'te rastlanır[137-138-150].

2.25.2 Bor Cevherlerinin Endüstride Kullanım Alanları

Üretilen bor minerallerinin % 10'a yakın bir bölümü doğrudan mineral olarak tüketilirken, geriye kalan %90 oranındaki kısmı bor cevherlerinden üretilen borat ürünleri elde etmek için kullanılmaktadır.

Dünyada bor tüketimi yüksek olmasına karşın tüketim alanları ülkelere göre çarpıcı şekilde sektörel bazda değişim göstermektedir. A.B.D'de ana tüketim sektörü izolasyon ve cam sanayi iken Avrupa ülkelerinde ise sabun ve deterjan sektörü, Japonya'da fiberglas ve tekstil sektörüdür. Belli başlı tüketim alanlarını; Cam ve Seramik sanayi, yanmayı önleyici maddeler, sabun ve deterjan sanayi, metalurji, tarım, nükleer sanayi, diğer sanayi sektörlerini oluşturur [137-150].

Bazı özel bor kimyasalları için kullanım alanları Tablo 2.17'de ve Şekil 2.16'da verilmiştir.

Tablo 2.17: Bazı özel bor kimyasallarının kullanım alanları[137]

Ürün	Kullanım Alanları
Amorf Bor	Askeri Piroteknik
Kristalin Bor	Nükleer Silahlar ve Nükleer Güç Reaktörlerinde muhafaza
Bor Flamentleri	Havacılık için Kompozitler, Spor malzemeleri için Kompozitler
Bor Halidleri(tuzları)	İlaç Sanayii, Katalistler, Elektronik Parçalar, Bor Flamentleri ve Fiber Optikler
Özel Sodyum Boratlar	Fotoğrafçılık Kimyasalları, Yapıştırıcılar, Tekstil “Finishing” Bileşikleri, Deterjan ve Temizlik Malzemeleri, Yangın Geciktiricileri, Gübreler ve Zırai Araçlar
Fluoborik Asit	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler
Trimetil Borat	Sodyum Bor Hidrürler
Sodyum Bor Hidrürler (Sodyum Borohidrat)	Özel Kimyasalları Saflaştırma, Kağıt Hamurunu Beyazlaştırma, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi
Bor Esterleri	Polimerizasyon Reaksiyonları için Katalist, Polimer Stabilizatörleri, Yangın Geciktiricileri

2.25.3 Dünya Bor Rezervi

Dünya bor rezervi ülkeler bazında Tablo 2.18’de verilmiştir.

Tablo 2.18: Dünya bor rezervleri [137]

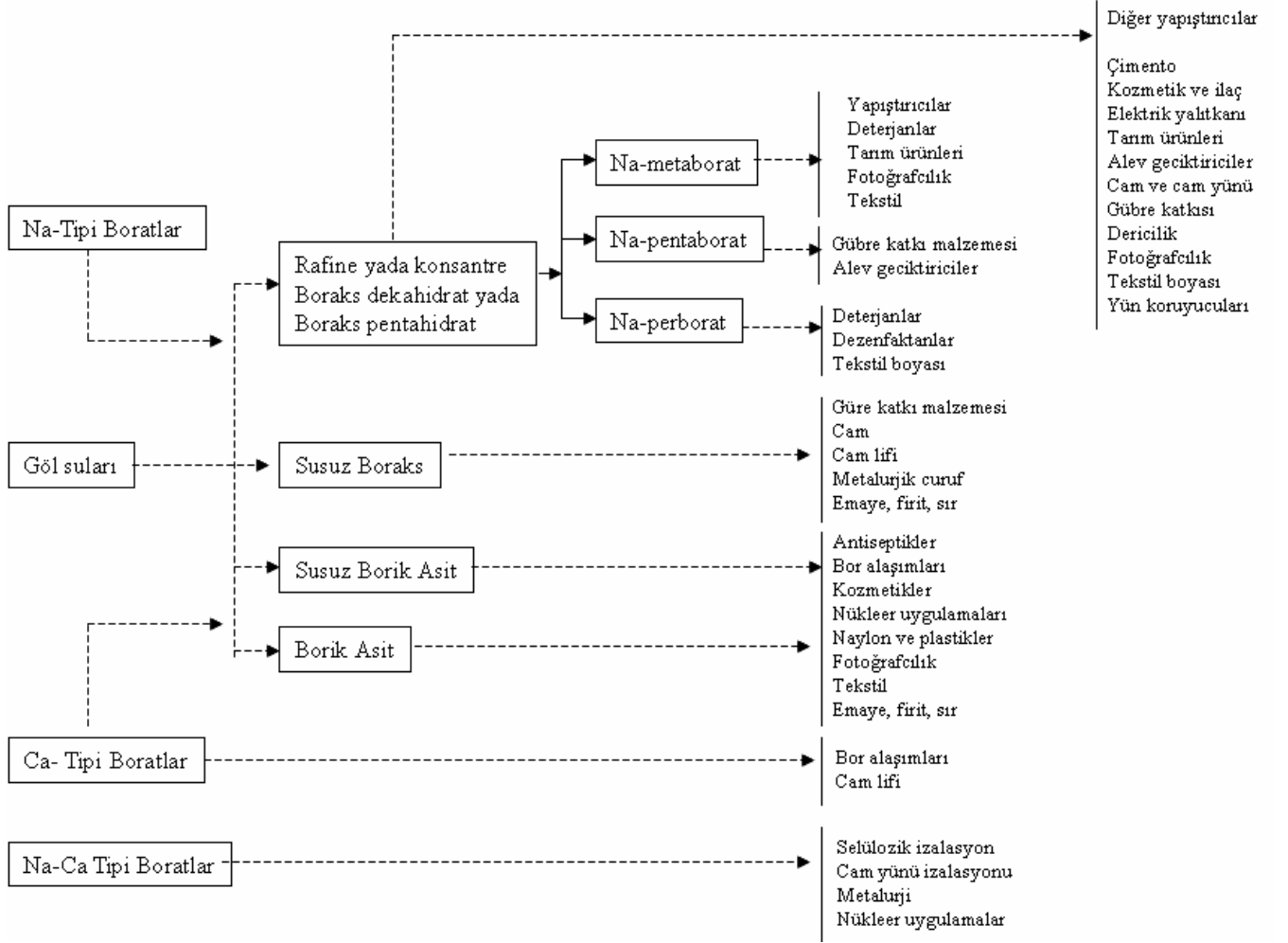
ÜLKE	GÖRÜNÜR EKONOMİK REZERV	MUHTEMEL MÜMKÜN REZERV	TOPLAM REZERV	TOPLAM REZERVDEKİ PAY (%)
Türkiye	227.000	624.000	851.000	72,20
A.B.D.	40.000	40.000	80.000	6,80
Rusya	40.000	60.000	100.000	8,50
Çin	27.000	9.000	36.000	3,10
Arjantin	2.000	7.000	9.000	0,80
Bolivya	4.000	15.000	19.000	1,60
Şili	8.000	33.000	41.000	3,50
Peru	4.000	18.000	22.000	1,90
Kazakistan	14.000	1.000	15.000	1,30
Sırbistan	3.000	0	3.000	0,30
TOPLAM (Bin Ton)	369.000	807.000	1.176.000	100,00

2.25.5 Türkiye Bor Yatakları

Türkiye bor yatakları BALIKESİR-Bigadiç, BALIKESİR-Susurluk, BURSA-Kestelek, ESKİŞEHİR-Kırka, KÜTAHYA-Emet ilçelerinde yer almaktadır. Bu yataklardan Eskişehir-Kırka bor yatağı bugüne kadar dünyanın bilinen en büyük bor yatağıdır [137-150]. Türkiyede bulunan bor minerallerinin nerelerde bulunduğu ve bor içerikleri Tablo 2.19’da verilmektedir.

Tablo 2.19: Türkiye’de bulunan bor mineralleri ve B₂O₃ içerikleri[137]

Mineral	Kimyasal Bileşimi	%B ₂ O ₃	Bulunduğu Yatak
İnyoit	2CaO.3B ₂ O ₃ .13H ₂ O	37,62	Kırka, Bigadiç
Meyerhoferit	2CaO.3B ₂ O ₃ .7H ₂ O	46,72	Kırka, Emet, Bigadiç
Kolemanit	2CaO.2B ₂ O ₃ .5H ₂ O	50,81	Kırka, Emet, Bigadiç, Susurluk, Kestelek
Terşit	4CaO.5B ₂ O ₃ .20H ₂ O	37,32	Bigadiç
Pandermit	4CaO.5B ₂ O ₃ .7H ₂ O	54,59	Bigadiç, Susurluk
Uleksit	Na ₂ O.2CaO.5B ₂ O ₃ .16H ₂ O	42,95	Kırka, Emet, Bigadiç, Kestelek
Probertit	Na ₂ O.2CaO.5B ₂ O ₃ .10H ₂ O	49,72	Kestelek
Tinkal	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .10H ₂ O	36,51	Kırka
Tinkalkonit	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .5H ₂ O	47,80	Kırka
Kernit	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .4H ₂ O	51,02	Kırka
Hidroborasit	CaO.MgO.3B ₂ O ₃ .6H ₂ O	50,53	Kırka, Emet, Bigadiç
Inderborit	CaO.MgO.3B ₂ O ₃ .11H ₂ O	41,49	Kırka
Inderit	2MgO.3B ₂ O ₃ .15H ₂ O	37,32	Kırka
Kurnakovit	2MgO.3B ₂ O ₃ .15H ₂ O	39,89	Kırka
Tunellit	4SrO.3B ₂ O ₃ .4H ₂ O	54,32	Kırka, Emet, Bigadiç
Vicit-A	4SrO.11B ₂ O ₃ .7H ₂ O	58,16	Emet
Howlit	4CaO.5B ₂ O ₃ .2SiO ₂ .5H ₂ O	44,49	Bigadiç, Susurluk
Terujit	4CaO.MgO.6B ₂ O ₃ .AsO ₅ .4H ₂ O	32,76	Emet
Kahnit	4CaO.B ₂ O ₃ .AsO ₅ .4H ₂ O	11,69	Emet

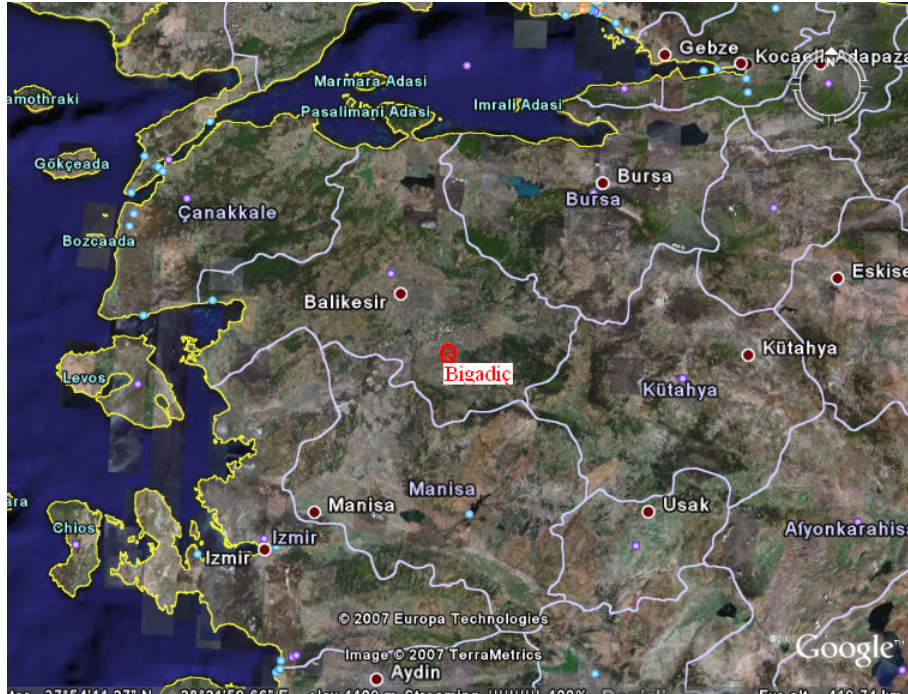


Şekil 2.16: Bor bileşikleri ve kullanım alanları[161]

3 MALZEME VE YÖNTEM

3.1 DENEYLERE ESAS OLAN NUMUNE

Deneyisel çalışmalara esas olan kolemanit ve üleksit örnekleri; Eti Maden İşleri Genel Müdürlüğü Bigadiç Bor İşletme Müessesesi'nden temin edilmiştir. Çalışmalar saf kolemanit ve üleksit mineralleri üzerinde yürütüleceği için numuneler Simav kolemanit ve Acep üleksit ocaklarından temiz ve iri kristaller olacak şekilde el ile toplanmıştır. Yaklaşık olarak 100'er kg toplanan örnekler daha sonra İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme laboratuvarlarına getirilmiştir. Şekil 3.1'de numunelerin temin edildiği bölgenin yer belirleme haritası verilmiştir.



Şekil 3.1: Balıkesir-Bigadiç bor işletmesi yer belirleme haritası

3.2 KARAKTERİZASYON TESTLERİ

3.2.1 Numune Hazırlama

Numune üzerinde ilk olarak yapılan işlem, temizleme yani kristal yüzeylerindeki kil gibi safsızlıkların uzaklaştırılması olmuştur. Bundan sonra doğal kurutma işlemi yapılarak (açık havada) yüzey nemi giderilen numuneler, öncelikle boyut küçültme işlemine tabi tutulmuşlardır.

Ortalama tane boyutu 200 mm olan numuneler öncelikle bir çekiç vasıtası ile çeneli kırıcıya girecek tane boyutuna yaklaşık 50 mm'ye indirildikten sonra primer bir kırıcı olan tek istinat kollu laboratuvar tipi çeneli kırıcı vasıtası ile iki kademede kırılmıştır. Böylelikle malzemenin tane boyutunun tamamı 20 mm altına indirilmiştir. Elde edilen kırılmış ürün 20 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm ve 1 mm'lik elekler kullanılarak tane boyut guruplarına ayrılmış ve her bir tane boyut gurubundaki malzeme ileriki deneylerde kullanılmak üzere naylon poşetlere alınarak arşivlenmiştir.

Her iki kolemanit ve üleksit numunelerinden temsili örnekler alınmış ve bu temsili örnekler üzerinde karakterizasyon testlerine başlanmıştır.

3.2.2 Kimyasal İnceleme

Karakterizasyon testleri kapsamında ilk olarak numunelerin komple kimyasal analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler Eti Maden A.Ş. Bigadiç Bor İşletmesi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir. B_2O_3 ve H_2O analizleri volumetrik (titrimetrik), diğer analizler X-Ray Floresans cihazında yapılmıştır.

Tablo 3.1: Numunelerin tam kimyasal analizi

Bileşen	B_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	SiO_2	SO_4	SrO	Al_2O_3	Fe_2O_3	As	Ateş
Numune										ppm	zaiyatı
Kolemanit	49,17	26,71	0,25	1,27	2,95	0,26	0,09	0,08	0,012	3,030	19,01
Üleksit	42,98	13,80	3,20	0,46	1,78	0,20	0,74	0,05	0,010	33,33	35,90

Kolemanit mineralinin %49,17 B_2O_3 ve üleksit minerallerinin % 42,98 B_2O_3 içerdiği görülmektedir.

3.2.3 Isıl Özelliklerin İncelenmesi

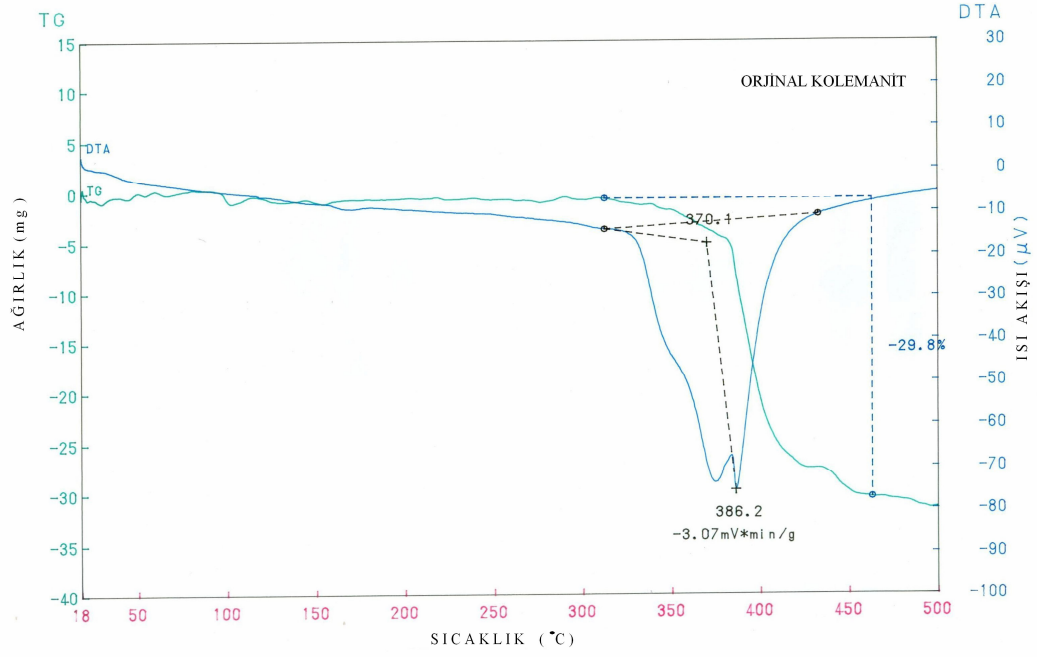
Termo Gravimetrik Analiz (TGA) cihazı, artan ortam sıcaklığına bağlı olarak malzemenin kütle değişimini termobalans ile sürekli olarak ölçmektedir. Malzemedeki nem ve uçucu madde miktarı hakkındaki bilgiyi kütle kaybı değişimi olarak verir. Maksimum 1000 °C'ye kadar değişik gaz atmosferlerinde çalışılabilir. Tipik ısıtma sıcaklığı 10 °C/dak ve optimum örnek ağırlığı ise 10-100 mg arasındadır.

Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazı, zamana bağlı olarak malzemelerin referans ve örnek arasındaki sıcaklık farkını artan sıcaklığa karşın ölçer. Isı akısının sıcaklık kontrollü bir ortamda değişimi, örnekte hangi sıcaklıkta ve ne kadar termal reaksiyona uğradığı ve bu reaksiyonların derecesi, ekzoterm ve endotermilerin, erime, kristallenme ve faz değişimleri hakkında bilgi vermektedir. Değişik gaz atmosferi altında 1300 °C'ye kadar işlem yapılabilir.

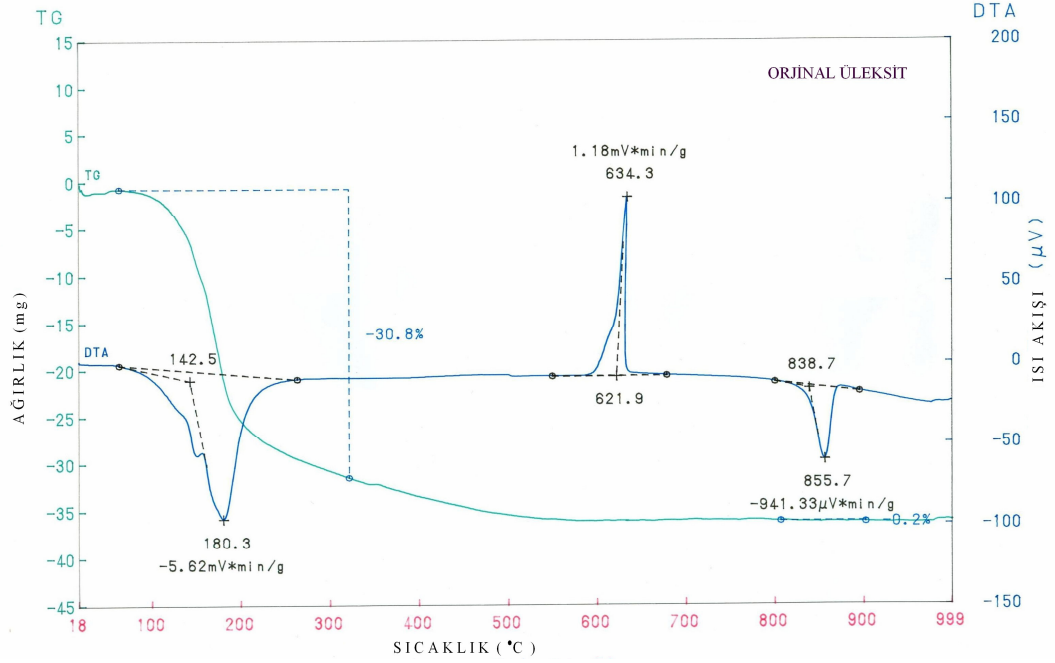
Testler; Maden Tetkik Arama laboratuvarında bulunan RİGAKU Thermal Analyzer Ver.2,22E1 model TG&DTA cihazında gerçekleştirilmiştir.

Bu testler; kolemanit ve üleksit minerallerinin ısı uygulaması sırasında uzaklaşan bünye suyunun miktarı, bozunmanın sıcaklığı, bozunma ve yeniden kristallenmenin doğası ve mekanizmasını tespit edebilmek için gerçekleştirilmiştir.

Orijinal kolemanit ve üleksit minerallerinin TG ve DTA grafikleri sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.2: Kolemanit mineralinin TG ve DTA eğrisi

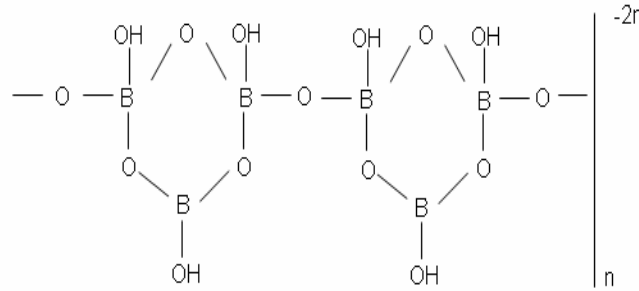


Şekil 3.3: Üleksit mineralinin TG ve DTA eğrisi

Yapılan literatür incelemesinde, kolemanitin $[\text{B}_3\text{O}_4(\text{OH})_3]_n^{-2n}$ polianyonlarından oluştuğu görülmüştür. Bu polianyonların; inyoit ve meyerhofferit polianyonlarının sonsuz zincirler halinde polimerleşmesi sonucu aşağıdaki verilen denklem uyarınca meydana geldiği kabul edilmektedir[135].



Dört bağ yapılı bor atomlarından ikisi oksijen ile birleşerek bir tetraedr oluşturmaktadır. Üçüncü bor atomu ise oksijen ile bağlanarak bir üçgen teşkil etmektedir. Bu üçgen ve tetraedrlr birer oksijen aracılığı ile birleşerek sonsuz zincirler oluşturmaktadır. Kolemanitin zincir bağ yapısı Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4: Kolemanitin zincir bağ yapısı[135]

Kolemanitin dehidrasyonunun 260°C 'lerde başladığı ve ilk bir molekül su kaybının 327°C 'lerde olduğu görülmektedir ki, bu da dekrepitasyonun başlaması ile de çakışmaktadır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 355°C 'ye kadar kolemanitin TG eğrisinden ağırlığında bir değişme olmadığı gözlenmiştir. $355\text{-}427^\circ\text{C}$ arasında 2 endotermik reaksiyonun varlığı görülmüştür ve 378°C ile 395°C 'ler de iki pik değer vermiştir. Bu iki reaksiyon kısmen 390°C 'de birbiri üstüne binmiş ve TG eğrisine bakıldığında yaklaşık olarak % 4 ağırlık kaybı gözlenmiştir. Kolemanitin kristal matriksindeki hızlı su kaybı düzensiz stresler oluşturmakta ve yapı dekrepite olmaktadır. Kolemanitin dehidrasyon verileri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Kolemanitin dehidrasyon verileri [135-136]

Su Kaybı/mol	Sıcaklık/ $^{\circ}\text{C}$	Su Kaybının Tipi
1	327	**
2	338	**
3	345	***
4	363	***
5	412	***
** Serbest kristal suyu, *** Polyanionların içindeki $(\text{OH})^-$ formundaki suyun uzaklaşması		

Üleksitin termal bozunması 60 ile 500 $^{\circ}\text{C}$ aralığında meydana gelmektedir. Şekil 3.3’de görüldüğü gibi üleksitin DTA eğrisi boyunca 3 ayrı reaksiyonun meydana geldiği göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki 94-243 $^{\circ}\text{C}$ arasında oluşmakta ve kısmen birbiri üstüne binmiş 2 endotermik pik içermektedir. Bunlardan ilki 150 $^{\circ}\text{C}$ ’de ve ikincisi ise 180 $^{\circ}\text{C}$ ’de bulunmaktadır. 151 $^{\circ}\text{C}$ de yaklaşık %8 ağırlık kaybına karşılık 2 mol suyunu kaybetmektedir. Burada $[\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$ kristal fazı oluşmaktadır. Dehidrasyon reaksiyonunun ikinci aşaması 151 $^{\circ}\text{C}$ de başlamış ve 260 $^{\circ}\text{C}$ ye kadar devam etmiştir. 180 $^{\circ}\text{C}$ de %17 ağırlık kaybına karşılık 4 mol su bünyeden uzaklaşmıştır. $\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ formunda yeni bir kristal oluşmuştur[77].

Dehidroksilasyon safhasının ilk aşaması 180-260 $^{\circ}\text{C}$ arasında yer almaktadır (dehidrasyon safhasının ikinci aşaması ile çakışmaktadır) ve yaklaşık %26 gibi bir ağırlık kaybı (bu 6 mol su kaybı ile uyuşmaktadır; 5 molü kristal suyunun uzaklaşması ve 1 molü OH grubundan ayrılındır) gerçekleşmektedir. Kalan 2 mol su da dehidroksilasyonun ikinci aşamasında 500 $^{\circ}\text{C}$ ye kadar yapıdan dereceli olarak uzaklaşmaktadır.

600-650 $^{\circ}\text{C}$ aralığında bir ekzotermik reaksiyonun varlığı görülmektedir ve bu 634 $^{\circ}\text{C}$ de bir pik vermiştir. Burada Amorf yapı NaCaB_5O_9 olarak tekrar kristallenmiştir [77]. Bunun yanında 855 $^{\circ}\text{C}$ ’de pik vermiş olan bir endotermik reaksiyonun varlığı da görülmektedir. 855 $^{\circ}\text{C}$ ’den sonra NaB_3O_5 amorf yapı içerisinde kalırken, NaCaB_5O_9 kristali CaB_2O_4 yapısına dönüşmüştür [77].

Üleksitin dehidrasyona başlama sıcaklığı 59 °C dir ve ilk bir mol suyunu 105 °C'de kaybeder.

Kolemanit dar bir sıcaklık aralığında suyunu kaybederken, buna karşılık üleksit daha geniş bir sıcaklık aralığında suyunu kaybetmektedir. Tablo 3.3'de üleksitin dehidrasyon verileri verilmiştir.

Tablo 3.3: Üleksitin dehidrasyon verileri [135-136]

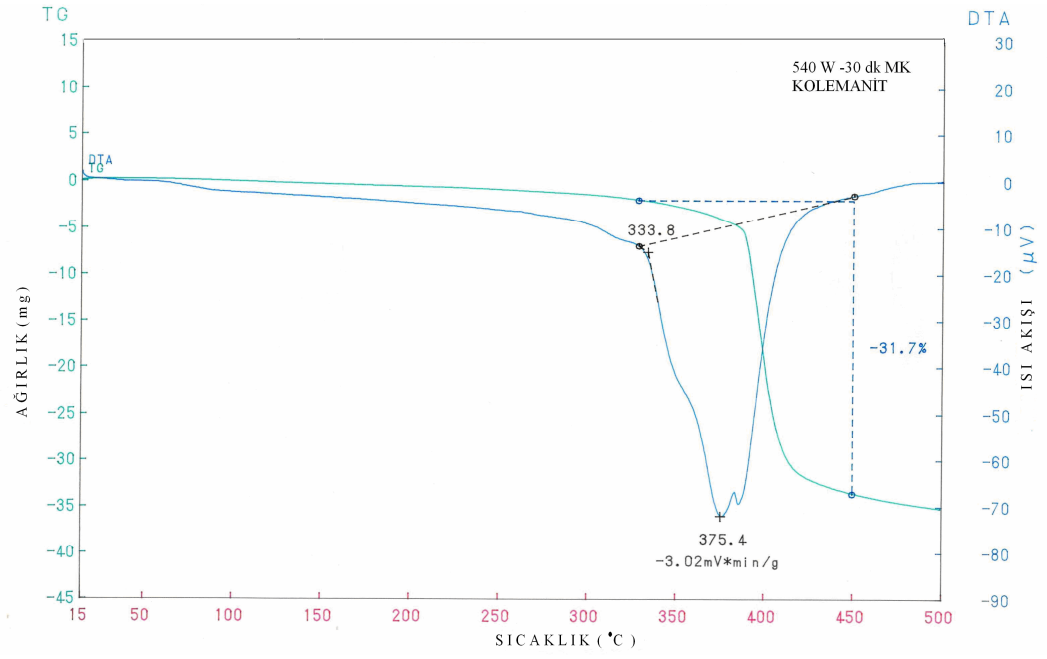
Su Kaybı/mol	Sıcaklık/ °C	Su Kaybının Tipi
1	105	*+**
2	137	**
3	162	**
4	178	**
5	185	**
6	196	***
7	267	***
8	449	***

* Kapiler su, ** Serbest kristal suyu, *** Polyanionların içindeki (OH)⁻ formundaki suyun uzaklaşması

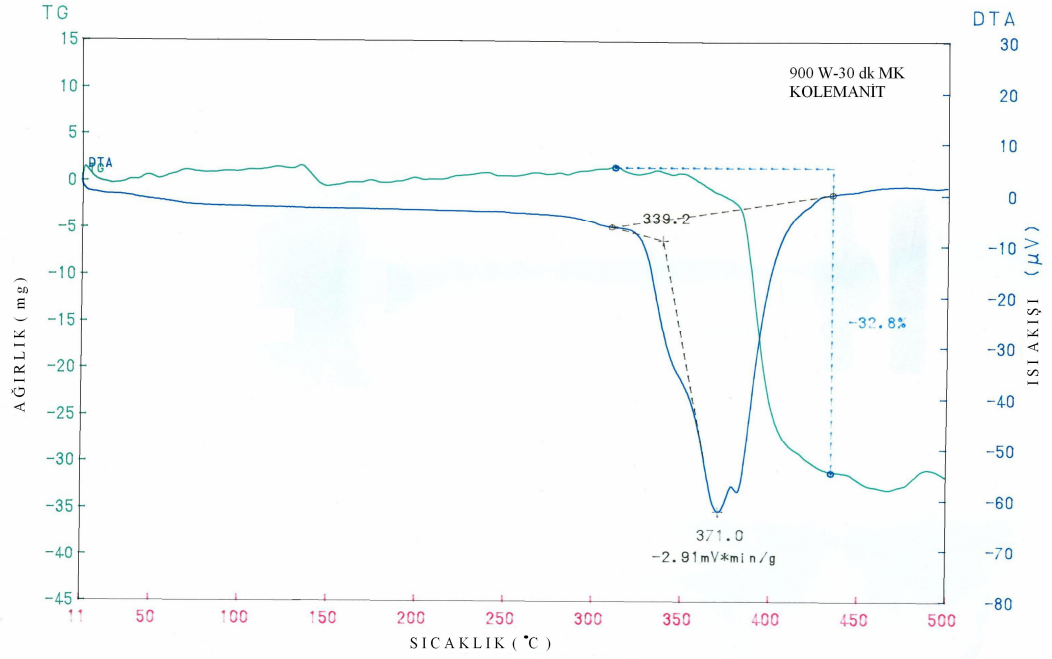
Saf numunelerin mikrodalga enerjisine nasıl tepki verdiklerini anlayabilmek için TGA/DTA analizleri mikrodalga enerjiye maruz bırakılmış saf kolemanit ve saf üleksit numuneleri üzerinde tekrarlanmıştır.

Kolemanit ve üleksit mineralinin sırası ile 540 W(orta seviye) ve 900 W(yüksek seviye) gücünde mikrodalga enerjiye maruz kalması ile elde edilen numunelerin de TG ve DTA analizleri yapılarak sonuçlar Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmiştir. Şekil 3,5'deki 540 W mikrodalga güç seviyesinde 30 dk işlem görmüş kolemanit numunesinin TG ve DTA grafiğini incelediğimizde; ağırlık kaybında çok küçük bir artışın olduğu, 375-385 °C aralığında yine iki endotermik pik verdiği görülmektedir.

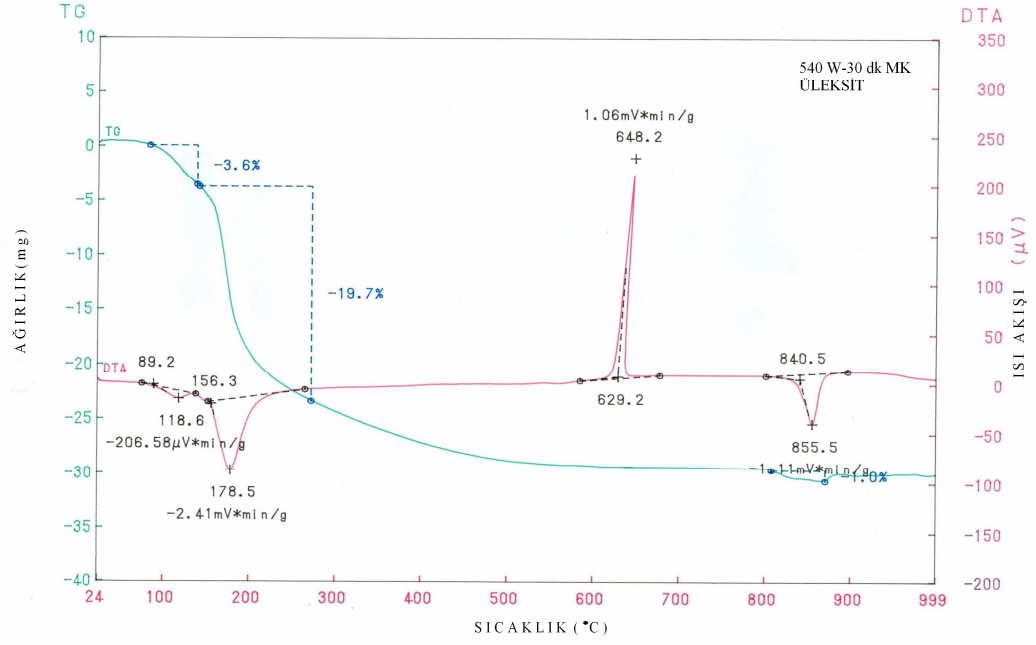
Şekil 3,6'daki 900 W mikrodalga güç seviyesinde 30 dk işlem görmüş kolemanit numunesinin TG ve DTA grafiğini incelediğimizde ise; ağırlık kaybının %32,8 e çıktığı ve 370-385 °C aralığında yine iki endotermik pik verdiği görülmektedir.



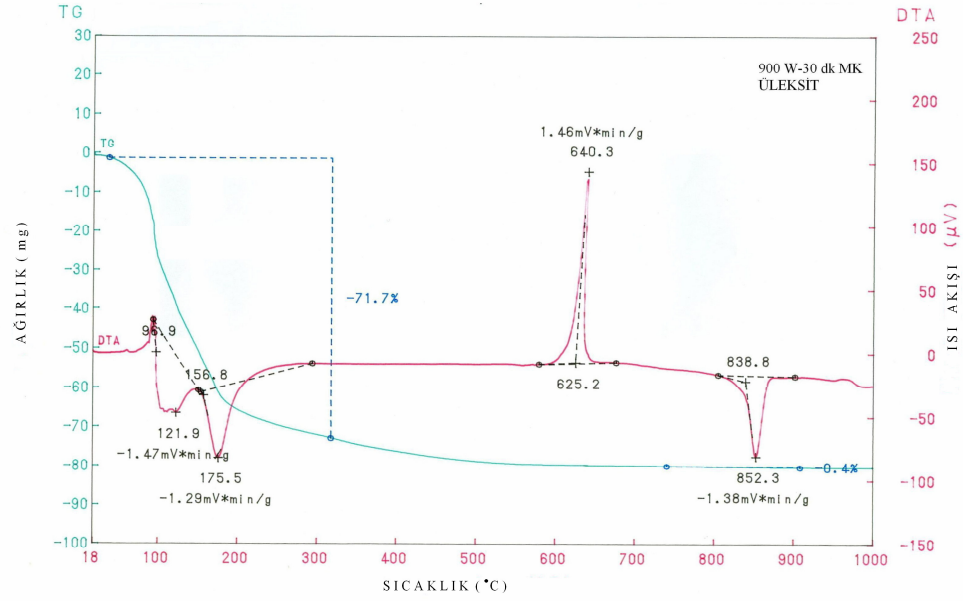
Şekil 3.5: 540 W'da mikrodalgaya maruz kalmış kolemanitin TG ve DTA eğrisi



Şekil 3.6: 900 W'da mikrodalgaya maruz kalmış kolemanitin TG ve DTA eğrisi



Şekil 3.7: 540 W'da mikrodalgaya maruz kalmış üleksitin TG ve DTA eğrisi



Şekil 3.8: 900 W'da mikrodalgaya maruz kalmış üleksitin TG ve DTA eğrisi

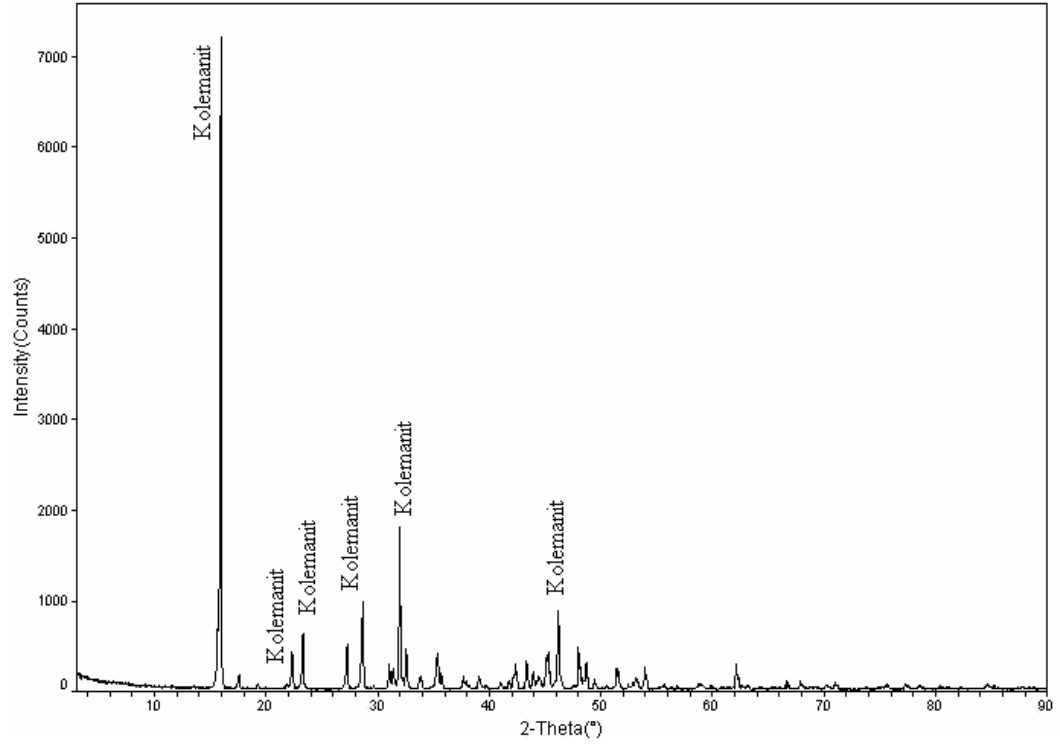
Şekil 3.7'deki 540 W mikrodalga güç seviyesinde 30 dk işlem görmüş üleksit numunesinin TG ve DTA grafiğini incelediğimizde; ağırlık kaybında çok küçük bir azalmanın olduğu bunun yanında 648 °C'de bir eksotermik reaksiyon gösterirken, 178 °C ve 855 °C'de yine iki endotermik pik verdiği görülmektedir.

Şekil 3.8'deki 900 W mikrodalga güç seviyesinde 30 dk işlem görmüş ve 7 mol suyunu kaybetmiş üleksit numunesinin TG ve DTA grafiğini incelediğimizde ise; geriye kalan 1 mol suyun yaklaşık %72'sinin bünyeden uzaklaştığı görülmektedir.

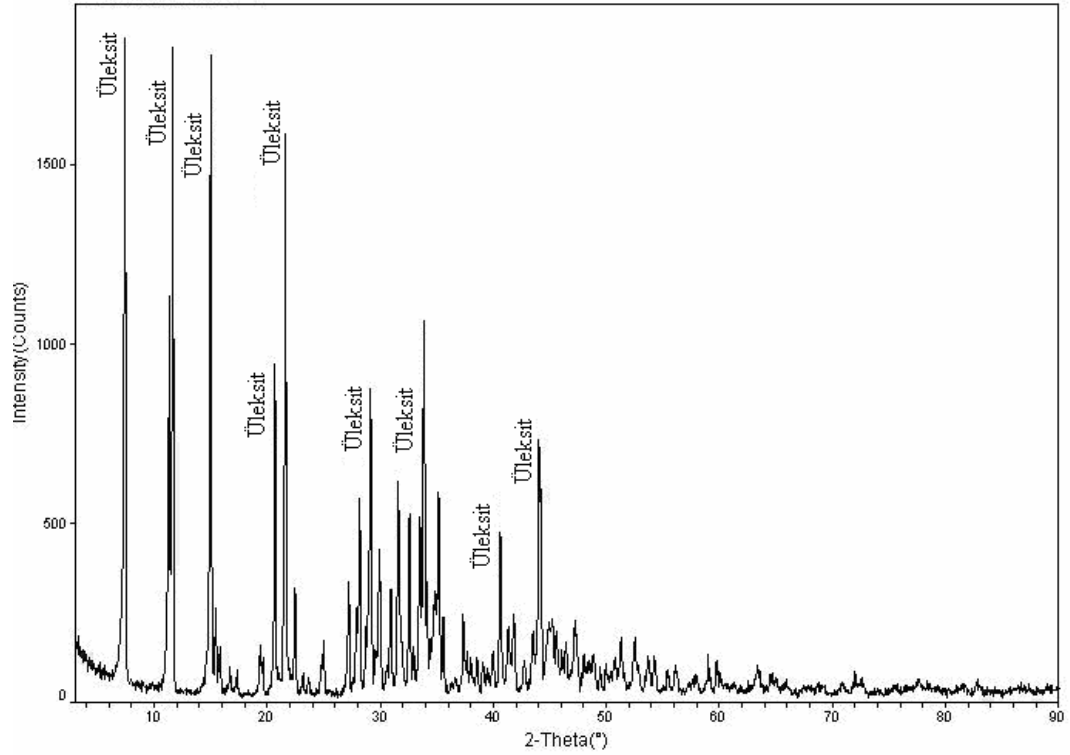
3.2.4 Mineralojik İnceleme

Temsili numuneler üzerinde mineralojik yapının belirlenmesi ve mikrodalga enerjiye maruz kaldıktan sonra oluşacak yeni yapıların tespit edilebilmesi için yapılan XRD (X-Ray Difraksion) analizlerinde de numunelerin saflık derecelerini teyit eder nitelikte kolemanit ve üleksit pikleri tespit edilmiştir. Saf kolemanit ve üleksit numunelerinin XRD grafikleri Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.

Ölçümler İstanbul Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren İleri Analizler Laboratuvarı (İAL)'nda bulunan Rigaku D/Max-2200/PC XRD Cihazı 200 Vac 3q 20 A/50 Hz güç kapasitesine sahip bir cihazda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9: Saf ama mikrodalga ön işlemsiz kolemanit mineraline ait XRD analizi



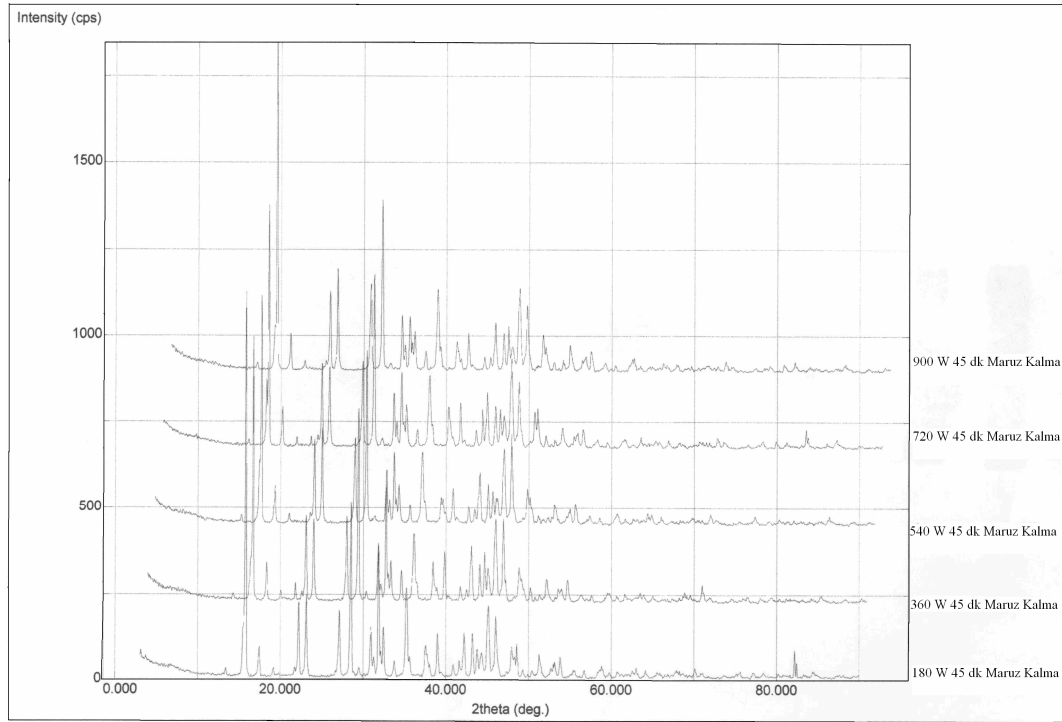
Şekil 3.10: Saf ama mikrodalga ön işlemsiz üleksit mineraline ait XRD analizi

Her bir kolemanit ve üleksit numunesinin farklı mikrodalga güç seviyelerinde farklı maruz kalma süreleri için XRD analizleri yaptırılmıştır.

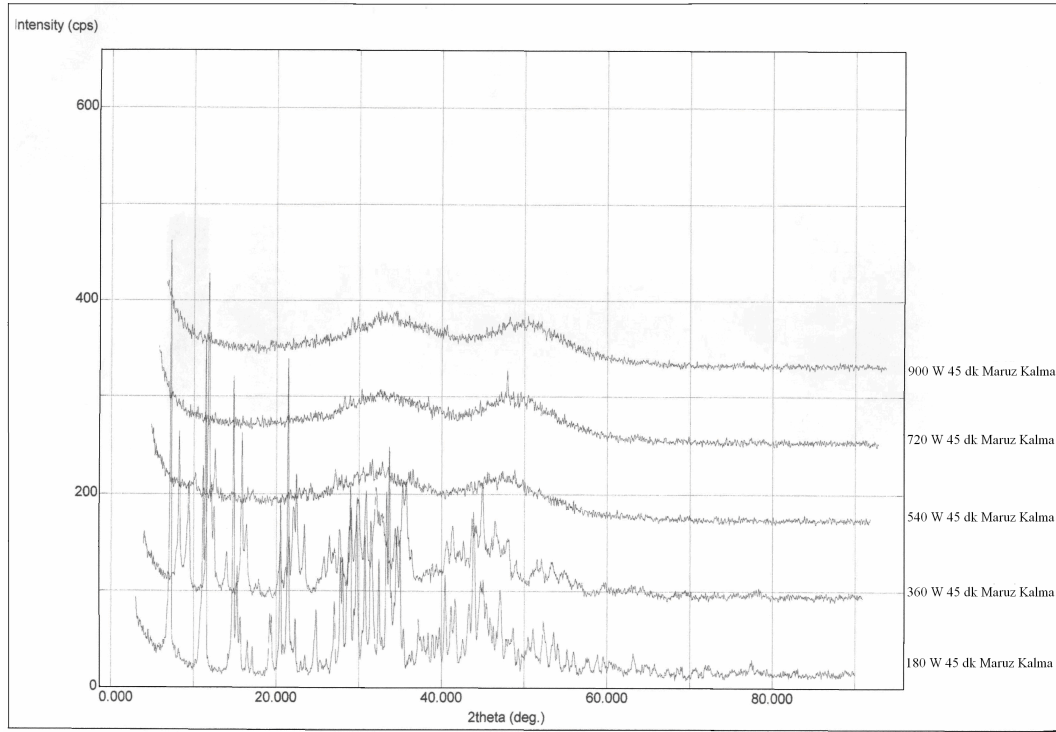
Beş farklı mikrodalga güç seviyesi için sırasıyla 10 dk, 15 dk, 30 dk ve 45 dk maruz kalma süreleri uygulanmıştır. Böylelikle numunelerin hangi güç seviyelerinde ve hangi maruz kalma süresinde bozunmaya başladıkları belirlenmeye çalışılmıştır. 45 dk maruz kalma süresinde farklı mikrodalga güç seviyeleri için çekilen XRD pikleri kolemanit ve üleksit için sırasıyla Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir.

Her iki şekil incelendiğinde kolemanitin her beş güç seviyesinde de mineralojik yapısını koruduğu, buna karşın üleksitin 360 W güç seviyesinden sonra yapısının hızlı bir şekilde bozulmaya başladığı 540 W ve yukarısında ise yapısının tamamen bozularak amorf bir hal aldığı görülmektedir.

Kolemanit ve üleksite ait çekilen diğer tüm XRD analizleri EK A’da verilmiştir.



Şekil 3.11: Kolemanitin farklı güç seviyelerinde 45 dk maruz kalma süresindeki XRD analizleri



Şekil 3.12: Üleksitin farklı güç seviyelerinde 45 dk maruz kalma süresindeki XRD analizleri

3.2.5 Fourier Transform-Infra Red (FT-IR) Analizi

Kolemanit ve Üleksit numunelerinin FT-IR analizleri aşağıdaki metot doğrultusunda İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarı (İAL) bünyesinde bulunan PERKİN ELMER Spectrum One FT-IR Spectrometer ile gerçekleştirilmiştir.

FT-IR KBr Pellet Metodu: Katı ve toz numuneler için kullanılmaktadır. Numune önce agat havanda KBr ile öğütüldükten sonra, 200 bar basınçla preslenip tablet haline getirilir. KBr görünür bölge dışında kaldığından alınan spektrum sadece numuneye aittir. Analiz sonucu, 3 taramanın ortalamasının alınmasıyla $4000-450\text{ cm}^{-1}$ aralığında verilir.

İnfrared spektroskopisi katı yüzeylerdeki gaz ve sıvı adsorbsiyonunun incelenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Kandidatif analizlerden çok kalitatif analiz

amacıyla kullanılmaktadır. Her mineralin kendine özgü bir spektromu olduğundan kolaylıkla kalitatif analizi yapılabilir.

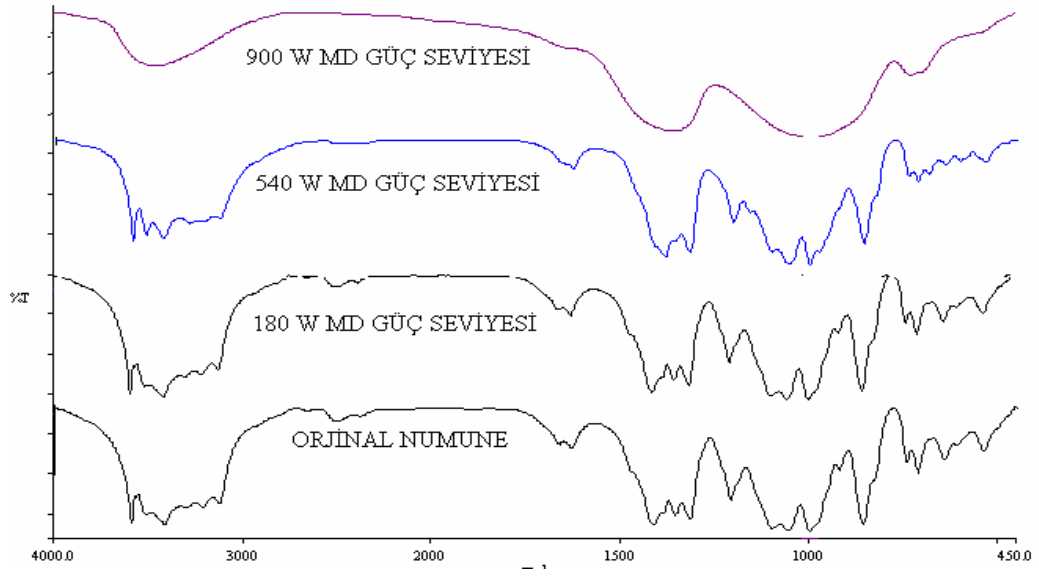
Şekil 3.13’de kolemanit numunesine ait tüm FT-IR analizleri karşılaştırma amacıyla bir arada verilmiştir.



Şekil 3.13:Orijinal ve işlem görmüş kolemanit numunelerinin toplu FT-IR analiz sonuçları

Farklı seviyelerde MD güç seviyelerine maruz kalmış kolemanit numunelerinin yapılan FT-IR analizlerine topluca baktığımızda bütün güç seviyelerinde yapının korunduğu ve bozulmadığı anlaşılmaktadır. Kolemanite ait bu sonuçlar da daha önce yaptırılan XRD analizleri ile örtüşmektedir.

Şekil 3.14’de üleksit numunesine ait tüm FT-IR analizleri karşılaştırma amacıyla bir arada verilmiştir.

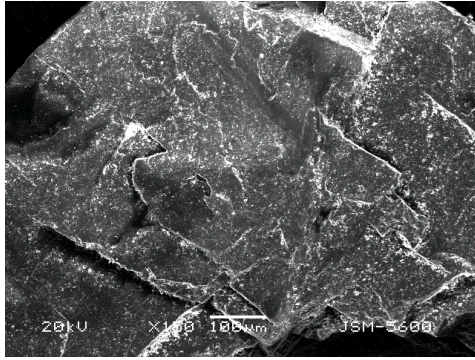


Şekil 3.14:Orijinal ve işlem görmüş üleksit numunelerinin toplu FT-IR analiz sonuçları

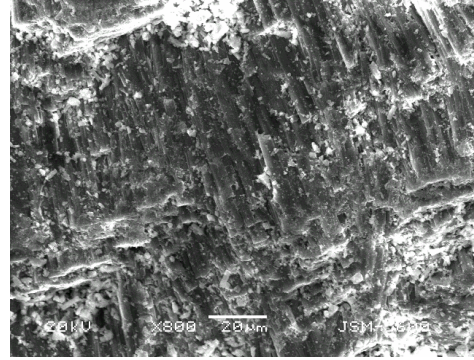
Bir arada gösterilen bu grafikten görüleceği üzere orijinal numune ile 180 W MD güç seviyesinde işlem görmüş numunenin analiz sonuçları bir değişim göstermezken, 540 W güç seviyesinden itibaren numunenin bozulmaya başladığı 900 W güç seviyesinde yapının tamamen bozulduğu anlaşılmaktadır. Bu da FT-IR analizlerinden elde edilen sonuçların daha önce XRD analizlerinden elde ettiğimiz sonuçlar ile örtüşmekte olduğunu göstermektedir.

3.2.6 Yüzey Karakterizasyonu

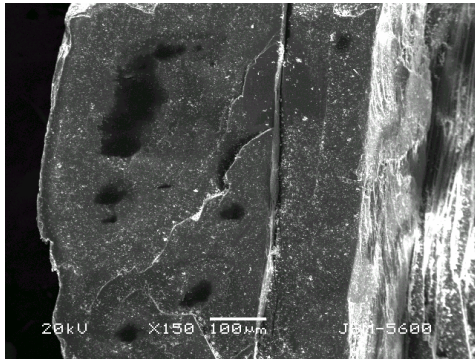
Yüzey karakterizasyonu testleri SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) ile İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri ile; orijinal (işlem görmemiş) numune ve 180 W, 540 W ve 900 W güç seviyelerinde belli bir süre mikrodalga enerjiye maruz bırakılmış numunelerin yüzeyleri boyunca meydana gelen yapısal değişimleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Kolemanit ve üleksit mineralleri için SEM mikroskop resimleri Şekil 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 ve 3.22’de verilmiştir. Çekilen SEM resimlerini genel olarak değerlendirdiğimizde de kolemanitin yüzey yapısında fark edilir bir değişimin meydana gelmediği yani dekrepite olamadığı görülmektedir. Üleksit mineralinin ise bünye suyunun dereceli uzaklaşması dolayısı ile kristal yapılarının daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.



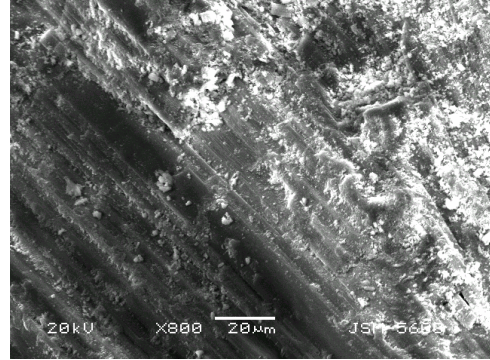
Şekil 3.15: Normal Kolemanit SEM resmi



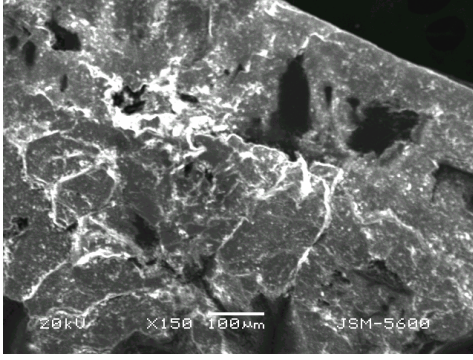
Şekil 3.16: Normal Üleksit SEM resmi



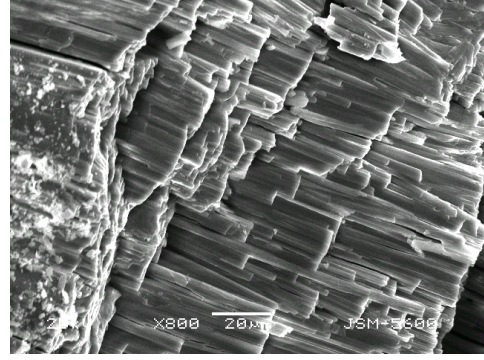
Şekil 3.17: 180 W Kolemanit SEM resmi



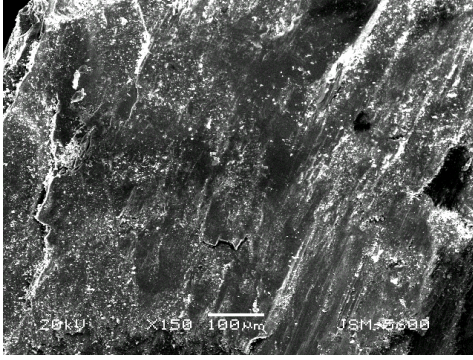
Şekil 3.18: 180W Üleksit SEM resmi



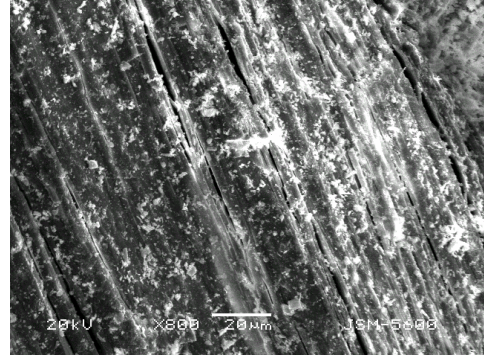
Şekil 3.19: 540 W K Colemanite SEM resmi



Şekil 3.20: 540 W Colemanite SEM resmi



Şekil 3.21: 900 W K Colemanite SEM resmi



Şekil 3.22: 900 W Colemanite SEM resmi

3.2.7 Mikrodalgaya Bağlı Sıcaklık ve Nem Analizi

Kolemanit ve üleksit mineralleri üzerinde mikrodalga güç seviyesine ve süreye bağlı olarak numunelerin ulaştıkları sıcaklıkları ve nem kayıplarını belirleyebilmek için bir dizi deney yapılmıştır.

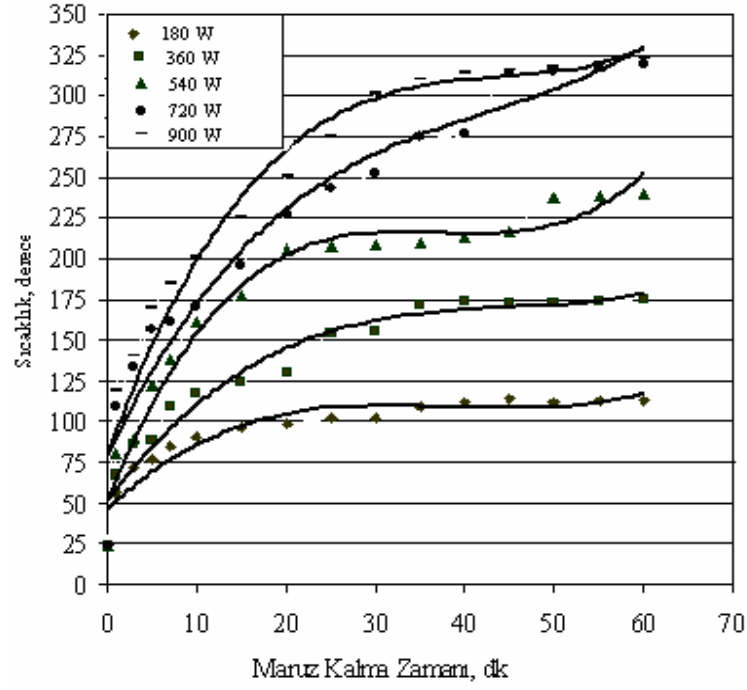
Mikrodalgaya bağlı tüm deneylerde 2450 MHz sabit frekans ve 900 W sabit güçte çalışan Arçelik MD595 model mutfak tipi bir mikrodalga fırın, ısı ölçümlerinde ise Voltcraft IR-1001A model infrared termometre kullanılmıştır. Sistematik deneylerde parametre olarak 5 farklı güç seviyesinin denenebilmesi için mikrodalga fırının 900 W olan sabit gücü mikrodalga fırın üzerinde bulunan bir ayar düğmesinin 5 farklı konuma getirilmesi ile uygulama süresine bağlı olarak sinüzoidal bir hareket yapan mekanizma yardımı ile 180-360-540-720-900 W seviyelerine ayarlanabilmiş ve bu değerler bir wattmetre ile kontrol edilmiştir. Deneyde kullanılan fırının resmi ve termometre Şekil 3.23’de verilmiştir.



Şekil 3.23: Deneylerde kullanılan Arçelik MD595 model mikrodalga fırın ve infrared termometre

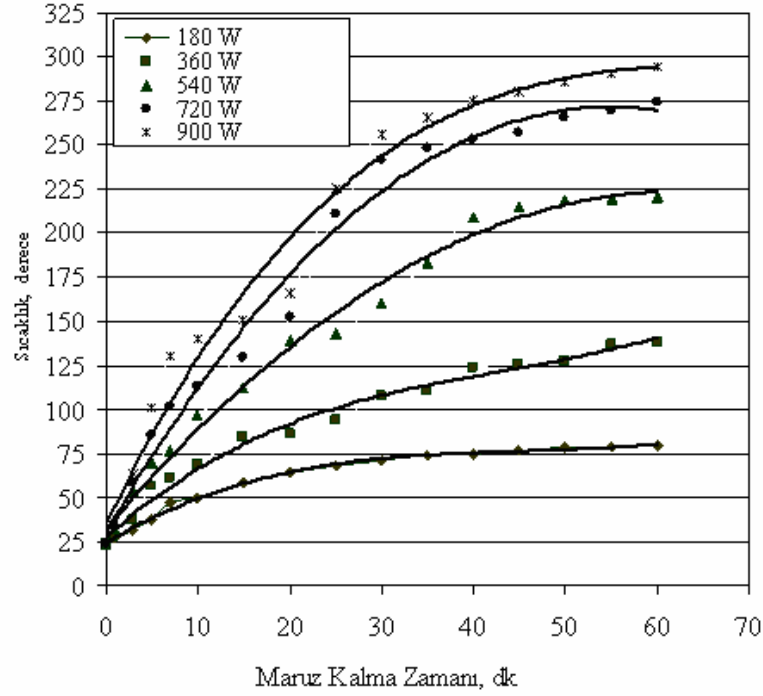
İnfrared termometre ile ancak numunelerin yüzey sıcaklıkları ölçülebilmektedir. Numunenin yüzeyinde ölçülen sıcaklıkların numunenin merkezindeki sıcaklıktan bir miktar daha düşük olduğu bilinmektedir. Elde edilen ölçümler doğrultusunda kolemanit ve üleksit için farklı mikrodalga güç seviyelerinde zamana bağlı sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de verilmiştir

Kolemanit



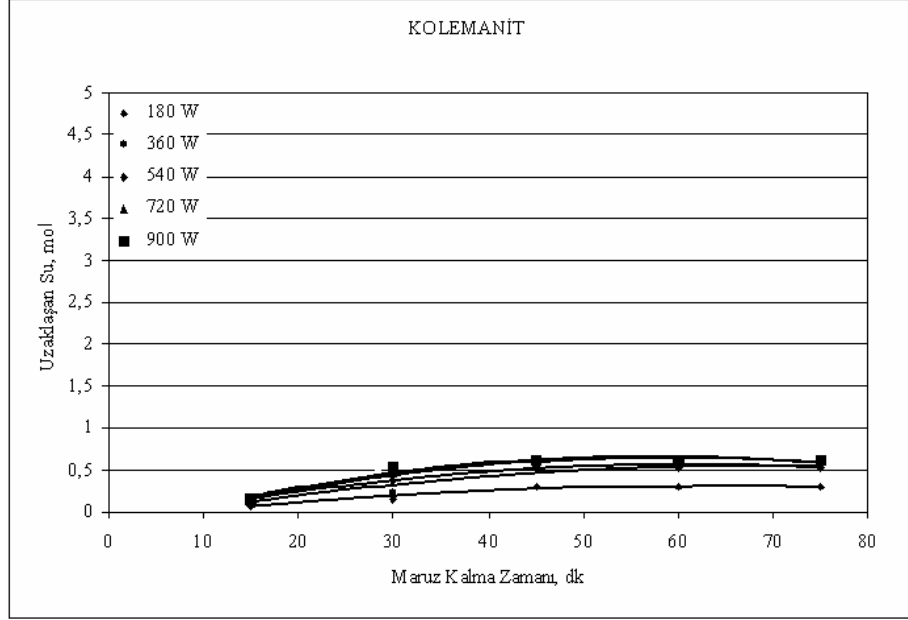
Şekil 3.24: Kolemanitin farklı güç seviyelerinde zamana bağlı sıcaklık değişimleri

Üleksit

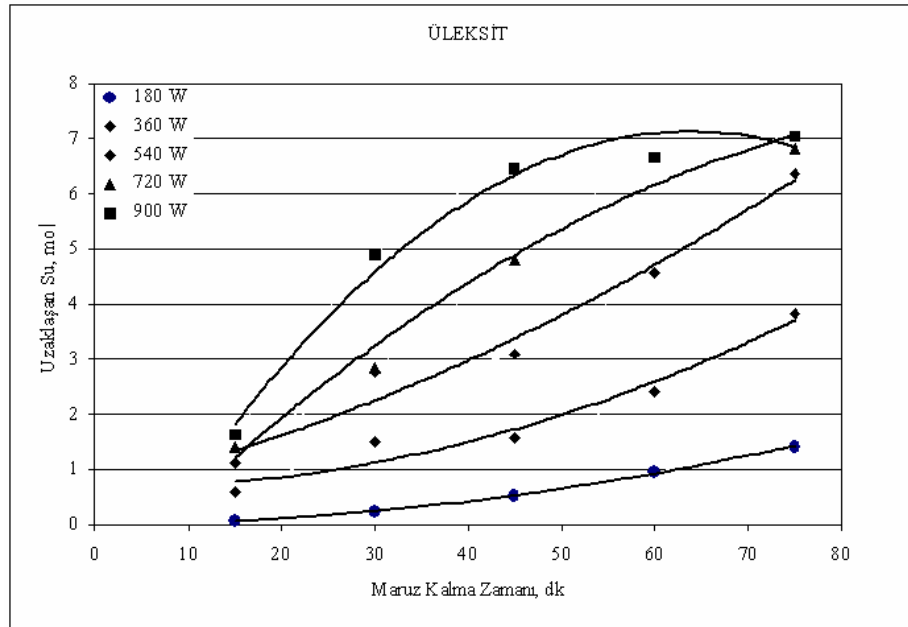


Şekil 3.25: Üleksitin farklı güç seviyelerinde zamana bağlı sıcaklık değişimleri

Grafikler incelendiğinde; güç seviyesi arttığında çok daha kısa zamanda çok daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmaktadır. Kolemanit ve üleksit mineralleri için farklı güç seviyelerinde ve farklı maruz kalma sürelerinde mikrodalga enerji altındaki bünye suyu kayıpları sırası ile Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de verilmektedir.



Şekil 3.26: Kolemanitin mikrodalgaya bağlı bünye suyu kayıp değerleri



Şekil 3.27: Üleksitin mikrodalgaya bağlı bünye suyu kayıp değerleri

Uygulanan güç seviyelerinde kolemanit numunesinin ulaştığı en yüksek sıcaklık değeri yaklaşık 320°C olarak ölçülmüştür. Literatürle uyumlu olarak TG-DTA verileri incelendiğinde bu sıcaklıklarda kolemanitin yaklaşık 0,6 mol suyunu kaybettiği görülmektedir. Dolayısı ile kolemanitteki su kaybının bu derece düşük kalmasının sebebi uygulanan güç seviyelerine bağlı olarak ulaşılan sıcaklığın düşük kalması olarak açıklanabilir.

Kolemanit ve üleksitin bünyesinde teorik olarak bulunan su miktarları atom ağırlıklarından yola çıkılarak hesaplandığında sırası ile kolemanit için toplam ağırlığının %21,91'i ve üleksit için toplam ağırlığının %35,56'sıdır. Örneğin kolemanit 900 W güç seviyesinde 75 dk mikrodalga enerjiye maruz bırakıldığında %2,67 ağırlık kaybına uğramaktadır. Bu değer kolemanitin sahip olduğu toplam su ağırlığının (%21,91) %12,18'ine tekabül etmektedir. Bunu mol cinsinden ifade ettiğimizde ($5\text{mol} \times 0,1218$) 0,61 mol su bünyeden uzaklaşmıştır.

Üleksit minerali 900 W güç seviyesinde 75 dk mikrodalga enerjiye maruz bırakıldığında %31,33 ağırlık kaybına uğramaktadır. Bu değer üleksitin sahip olduğu toplam su ağırlığının (%35,56) %88,10'una tekabül etmektedir. Bunu mol cinsinden ifade ettiğimizde ($8\text{mol} \times 0,8810$) 7,05 mol su üleksit bünyesinden uzaklaşmıştır.

3.2.8 Dielektrik Özelliklerinin Tayini

Saf kolemanit ve üleksit minerallerinin dielektrik özelliklerinin tespiti İ. Ü. Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Yüksek frekanslarda dielektrik ölçmek için hazırlanan düzenekte Transmisyon borusu yöntemi kullanılmıştır. Deneyde kullanılan frekans bandı 8-12 GHz arasında değişmektedir. Deneyde kullanılan boru parçasının geniş kenarı 22,86 mm ve dar kenarı 10,16 mm 'dir. Deneylerde kullanılan örneklerin yüzeylerinin tam olarak boru parçasının içine oturması deneyin doğruluğu için gereklidir. Bu yöntem ile kayıpsız dielektrik malzemelerin dielektrik sabitleri oldukça iyi bir yaklaşıklıkla elde edilebilmektedir. Bu kapsamda 11 GHz frekansta yapılan ölçümlerde; Kolemanitin kompleks dielektrik sabiti: $38,9437 (-5,6703/+1,0569)$ ve Üleksitin kompleks dielektrik sabiti $33,9758 (-1,8721/+5,6812)$ olarak ölçülmüştür.

3.3 YÖNTEM

3.3.1 Çözünürlük Deneyleri

3.3.1.1 Temel Bilgiler

Bor minerallerinin cevher hazırlama ve zenginleştirilmesinde büyük oranda sudan yararlanılmaktadır [26]. Yaş işlemler dolayısıyla hidrate bor minerallerinin bir kısmı suya karışarak çözelti fazına geçmekte ve katı kayıpları kaçınılmaz olmaktadır [25]. Çözünürlük deneyleri kapsamında mikrodalga enerjisinin kolemanit ve üleksit minerallerinin çözünürlük %katı kayıplarına olan etkisini incelenmiştir.

Deneylerde önce saf kolemanit ve üleksit numunelerinin farklı pülpte katı oranı, çözünme süresi ve farklı sıcaklıklarda su içerisindeki çözünürlük %katı kayıpları incelenmiş, daha sonra değişik güç seviyelerinde mikrodalga enerjiye maruz bırakılan numunelerin çözünürlük deneyleri yapılarak bir önceki elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan literatür araştırmasında bor minerallerinin çözünürlüğü ile ilgili pek çok araştırmanın yapıldığını görüyoruz [152-153-154-155-156-157-158-159].

Küçük ve Kocakerim [2005] üleksitin SO_2 ile doyurulmuş su içerisindeki çözünürlüğünü incelemişlerdir. Deneylerde optimum çözünme koşullarını tayin etmek için; tane boyutu, katı sıvı oranı, reaksiyon sıcaklığı, karıştırma hızı ve reaksiyon süresi Taguchi deneysel metodu yardımı ile analiz edilmiştir. Deneylerde Bigadiç bölgesi üleksit numunesi kullanılmıştır. 4 boyut gurubuna ayrılan numune ayrı ayrı çözündürme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Çözünme periyodu sonunda solüsyon içerisine geçen B_2O_3 miktarı titrimetrik yöntem ile belirlenmiştir. Optimum deney koşulları olarak 0,25 g/mL katı sıvı oranı, 30 dk reaksiyon zamanı, 400 d/dk karıştırma hızı 725 mikron tane boyutu ve 92 °C reaksiyon sıcaklığı olarak belirlenmiş ve bu koşullar altında çok yüksek bir B_2O_3 çözünürlüğü elde edilmiştir[152]

Künkül ve diğ.[1997], üleksitin karbondioksit ile doyurulmuş amonyum solüsyonu içerisindeki çözünürlük kinetiğini incelemişlerdir. Deney parametreleri olarak amonyum konsantrasyonu, tane boyutu, karıştırma hızı, katı sıvı oranı, reaksiyon sıcaklığı ve kabondioksit akış oranı incelenmiş, deney sonuçları atmosferik koşullarda karbonik asit

solüsyonları içerisinde üleksitin tamamen çözünebildiğini göstermiştir. Aynı zamanda üleksitin çözünürlüğünün; amonyum konsantrasyonunun, reaksiyon sıcaklığının ve kalsinasyon sıcaklığının artması ile doğru, tane boyutu ve katı sıvı oranının azalması ile ters orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Karbondioksit akış oranı ile karıştırma hızının bir etkisi olmadığı da belirlenmiştir[153].

Tunç ve diğ.[1999], üleksitin sülfirik asit solüsyonu içerisindeki çözünme mekanizmasını araştırmışlardır. Deneylerde SO_4^{-2} iyonlarının ve çözünme prosesindeki asit konsantrasyonunun etkileri incelenmiştir. Yine deneylerde H_2SO_4 , $\text{HCL} + \text{H}_2\text{SO}_4$, $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ solüsyonları kullanılmıştır. Bu çalışmada; H_3O^+ konsantrasyonunun artması ile çözünürlüğün arttığı, SO_4^{-2} konsantrasyonunun artması ile ise çözünürlüğün azaldığı tespit edilmiştir[154].

Gülensoy ve Kocakerim [1978], yaptıkları çalışmada orijinal ve kalsine edilmiş üleksitin karbondioksit doyurulmuş su içerisindeki çözünürlüğünü incelemişlerdir. Bu çalışmada zaman ve sıcaklık ana parametre olarak ele alınmıştır. Karşılaştırma yapmak için distile edilmiş su ile de bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Deneylerden; mineralin kalsinasyon sıcaklığının artmasının çözünürlüğe negatif etki yaptığı belirlenmiştir[155].

Alkan ve Kocakerim [1987], üleksitin kükürt dioksit doyurulmuş su içerisindeki çözünürlüğünü incelemişlerdir. Deneylerde; tane boyutu, gaz akış oranı ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. tane boyutu azaldıkça ve sıcaklık arttıkça üleksitin çözünürlüğünün arttığı, SO_2 akış oranının ise çözünürlüğü etkilemediği tespit edilmiş, çözeltinin aktivasyon enerjisi ise $58,01 \text{ kJ mol}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır[156].

Kocakerim ve Alkan [1988], yaptıkları bu çalışmada kolemanitin kükürt dioksit doyurulmuş su içerisindeki çözünürlüğünü incelemişlerdir. Deneylerde tane boyutu, sıcaklık ve karıştırma oranının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada da tane boyutu azaldıkça ve sıcaklık arttıkça kolemanitin çözünürlüğünün arttığı ancak karıştırma oranının bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir[157].

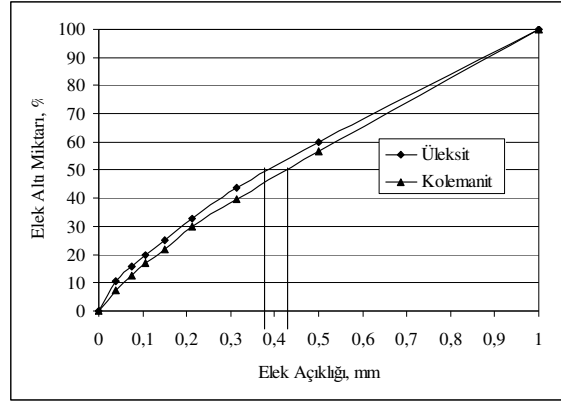
Alkan ve diğ.[1985], kolemanitin karbondioksit doyurulmuş su içerisindeki çözünürlüğünü incelemişlerdir. Deneylerde karşılaştırma yapabilmek için orijinal

kolemanit ve kalsine edilmiş kolemanit ayrı ayrı test edilmiştir. Tane boyutu, kalsinasyon sıcaklığı ve reaksiyon sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Deneylerden; tane boyutu arttıkça çözünme oranının azaldığı ve kalsinasyon ve reaksiyon sıcaklığının artması ile çözünürlüğün arttığı tespit edilmiştir. 400 °C’de kalsine edilmiş örneğin solüsyonunun aktivasyon enerjisi 57,7 kJ/mol olarak bulunmuştur[158].

Özkan [1999], kolemanit cevherinin çözünürlüğü üzerinde yaptığı araştırmada, çözünme zamanı, tane boyutu katı sıvı oranı ve karıştırma hızının çözünmeye olan etkilerini test etmiştir. Her bir deneyden sonra çözelti filtre edilmiş, kurutulmuş, tartılmış ve başlangıç numunesine göre ağırlık kayıpları not edilmiştir. Sadece malzeme kaybı not edilmiş, çözelti kimyasal analize tabi tutulmamıştır. Yazar yaptığı bir dizi deney sonucunda kolemanitin çözünürlüğünün tane boyutu büyüdükçe arttığı, karıştırma hızı büyüdükçe arttığı fakat belli bir seviyede sabitlendiği, katı sıvı oranı arttıkça çözünürlüğün azaldığı ve çözünürlük süresi arttıkça çözünürlüğün önce arttığı sonra sabitlendiğini rapor etmiştir[159].

3.3.1.2 Malzeme

Deneyssel çalışmalara esas olan kolemanit ve üleksit numuneleri; Eti Maden İşletmeleri, Balıkesir Bigadiç Bor İşletmesinden temsili olarak ayrı ayrı alınmıştır. Numuneler gerekli temizleme ve hazırlama aşamalarından sonra çözündürme deneyleri kapsamında kullanılmak üzere -1 mm tane boyutuna indirilmiştir. Çözündürme deneylerinde 20’şer gramlık kolemanit ve üleksit numuneleri kullanılmıştır. -1 mm boyut grubunda bulunan bu numunelerin tane boyut dağılımlarını incelemek için her bir numune elek analizine tabi tutulmuştur. Yapılan elek analizinden elde edilen veriler doğrultusunda kolemanit ve üleksit minerallerinin kümülatif elek altı eğrileri çizilerek Şekil 3.28’de verilmiştir



Şekil 3.28: Kolemanit ve üleksit minerallerinin kümülatif elek altı eğrileri

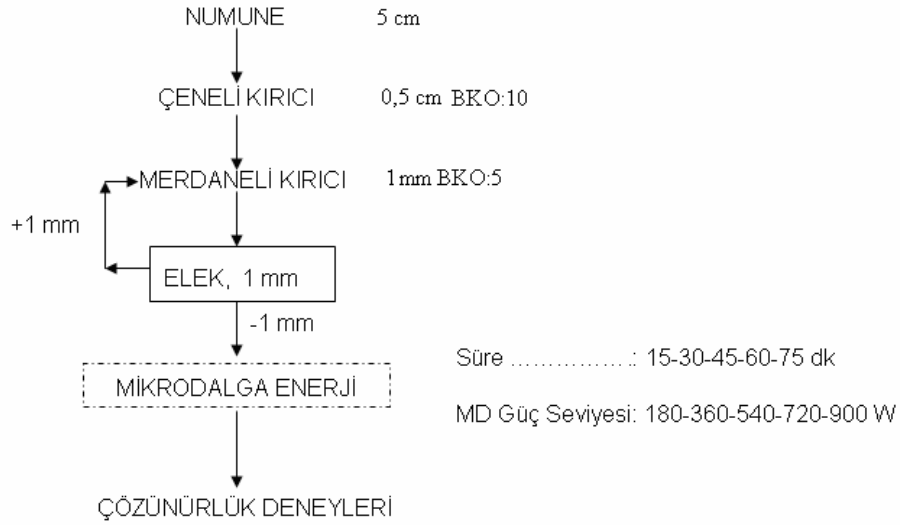
Grafik incelendiğinde kolemanit ve üleksit numunelerinin d_{50} boyutlarının sırası ile; 0,42 mm ile 0,38 mm olduğu tespit edilmiştir.

3.3.1.3 Yöntem

Mikrodalga enerjinin kolemanit ve üleksit minerallerinin sudaki çözünürlüğü üzerindeki etkilerini incelemekten önce karşılaştırma yapabilmek için işlem görmemiş kolemanit ve üleksit numunelerinin çözünürlük karakteristikleri incelenmiştir. Bu deneylerde sıcaklık, pülpte katı oranı ve çözünme süresi gibi farklı parametrelerin suda çözünürlüğe olan etkisi araştırılmıştır. Deneylerde karıştırma hızı sabit tutulmuş, çözücü olarak destile su kullanılmıştır.

Deneylerde; oda sıcaklığı(22 °C) , 45 °C ve 60 °C olmak üzere su sıcaklık değeri, %5, %10, %15, %20 ve %25 pülpte katı oranı değeri, 30 dk, 45 dk, 60 dk, 75 dk ve 90 dk çözünme süresi olarak alınmıştır. Kolemanit ve üleksit mineralleri için deneylerden elde edilen tüm veriler EK B1’de verilmiştir.

Normal deneylerden sonra değişik güç seviyelerinde mikrodalga radyasyona maruz bırakılan numunelerin çözünürlük deneyleri yapılarak bir önceki elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler kolemanit ve üleksit numuneleri için EK B2’de verilmiştir. Deneysel akım şeması Şekil 3. 29’da verilmiştir.



Şekil 3. 29: Çözünme deneyleri akım şeması

3.3.2 Öğütme Deneyleri

3.3.2.1 Temel Bilgiler

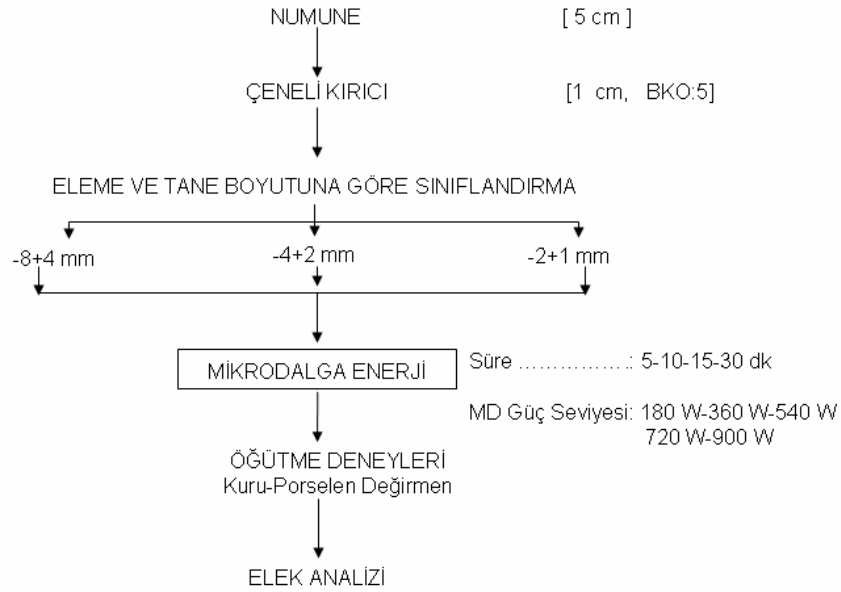
Öğütme işlemi, cevher hazırlama işlemleri içerisinde kullanılan enerjinin %50-70'ini harcamaktadır. Bundan başka konvansiyonel öğütme proseslerinin enerji verimliliği yaklaşık olarak %1 civarındadır. Yani harcanan enerjinin yalnızca çok küçük bir kısmı minerallerin öğütülmesinde harcanmaktadır. Bölüm 2.14'de mikrodalgaya bağlı öğütme konusunda detaylı literatür bilgisi verilmişti. Burada; mikrodalga enerjinin minerallerin faz yapıları boyunca termal gerilimler ürettiği ve bu termal gerilimin mineral tane sınırları boyunca mikro çatlaklar meydana getirdiği belirtilmişti. Bu mikro çatlaklar ise cevher örneğini daha kolay öğütme için çok uygun hale getirmektedir. Bu da tesis ekonomisini önemli ölçüde artı yönde etkilemektedir.

3.3.2.2 Malzeme

Deneylerde kullanılan numuneler, Eti Maden İşletmeleri Balıkesir Bigadiç Bor İşletmesi'ne bağlı ocaklardan alınan kolemanit ve üleksitdir. El ile toplanan iri kristaller daha sonra yüzey safsızlıkları yıkanıp temizlendikten sonra kurutulmuş ve -8+4 mm, -4+2 mm, -2+1 mm olarak 3 farklı tane boyut grubuna ayrılmıştır. Öğütme deneyleri her bir tane boyut grubu üzerinde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Böylelikle mikrodalga enerjinin tane boyutuna olan etkisi de araştırılmıştır.

3.3.2.3 Yöntem

Her bir tane boyut grubundaki numunelerden 100 gr'lık temsili örnekler alınarak her biri ayrı ayrı 180 W, 360 W, 540 W, 720 W ve 900 W mikrodalga güç seviyelerinde farklı maruz kalma sürelerinde 5 dk, 10 dk, 15 dk ve 30 dk mikrodalga enerjiye tabi tutulmuşlardır. Deney sonucunda numuneler desikatörde soğutularak öğütme deneylerine geçilmiştir. Öğütme deneyleri kuru ortamda 2,5 lt hacimli seramik bilyalı değirmen içerisinde gerçekleştirilmiştir. Öğütücü eleman şarj miktarı %40 ve öğütme süresi her bir deney için 15 dk olarak sabit tutulmuştur. Deney sonunda numuneler Ro-Tape(otomatik eleme cihazı) ile kuru eleme işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler ile kümülatif elek altı eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler yardımı ile de mikrodalga enerjinin numunelerin öğütülebilirliğine olan olumlu veya olumsuz etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.30'da deneysel akım şeması verilmiştir.



Şekil 3.30: Öğütme deney akım şeması

3.3.3 Manyetik Ayırma Deneyleri

3.3.3.1. Temel Bilgiler

Kolemanit ve üleksit mineralleri literatürde manyetik özellik göstermeyen mineraller içerisinde sayılmaktadır. Bor minerallerine manyetik ayırma ile zenginleştirme işlemini Arjantin ve ABD’de rastlanmaktadır. Arjantin’in Puna bölgesinde ve A.B.D. Kaliforniya eyaletinde bulunan bor işletmelerinde, yüksek alan şiddetli sabit mıknatıslı manyetik ayırıcılar kullanarak non-manyetik borat minerallerinin yan kayacı olan killi matriksten ayrılması işlemi gerçekleştirilmektedir. Bor yatağındaki killer, nadir toprak elementlerinden imal edilmiş çok güçlü mıknatıslar ile çekilebilen ve paramanyetik bir demir sülfür minerali olan az miktardaki pirotit minerali içermektedir[163] .

Manyetik ayırma teknolojisindeki gelişmeler ile 1,2 Tesla ile sınırlı olan manyetik alan şiddeti, Neodyyum-Bor-Demir alaşımından yapılan, yeni nesil mıknatıslar ile 2 Tesla’ya kadar arttırılabilmektedir. Bu sayede çok düşük manyetik duyarlılıktaki taneler bile kolaylıkla non-manyetik malzemeden ayrılabilir [163].

3.3.3.2. Malzeme

Manyetik ayırma ile zenginleştirme deneylerinde; çeneli ve merdaneli kırıcı ile kırılmış ve eleme ile 4 tane boyut grubuna ayrılmış kolemanit ve üleksit mineralleri kullanılmıştır. Boyut grupları sırası ile -2+1 mm, -1+0,5 mm, -0,5+0,250 mm ve -0,250 mm’dir. Deneyler 200’er gramlık numuneler ile yapılmıştır.

3.3.3.3 Yöntem

Manyetik ayırma deneylerinde, Boxmag Rapid marka yüksek alan şiddetli, tek diskli, kuru elektromanyetik ayırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.31’de kullanılan manyetik ayırıcı cihazının resmi verilmiştir. Cihazda yapılabilen ayarlar arasında; malzeme besleme hızı, taşıyıcı bant hızı, akım şiddeti ve disk yüksekliğine bağlı olarak oluşturulan manyetik alan büyüklüğü bulunmaktadır. Cihazda maksimum 1,65 Tesla büyüklüğünde bir manyetik alan elde edilebilmektedir. Malzeme besleme miktarı ve bant hızı bütün deneylerde sabit tutulmuş, tane boyutuna bağlı olarak disk yüksekliği ve akım şiddeti değiştirilerek farklı manyetik alanlar oluşturulmuştur.

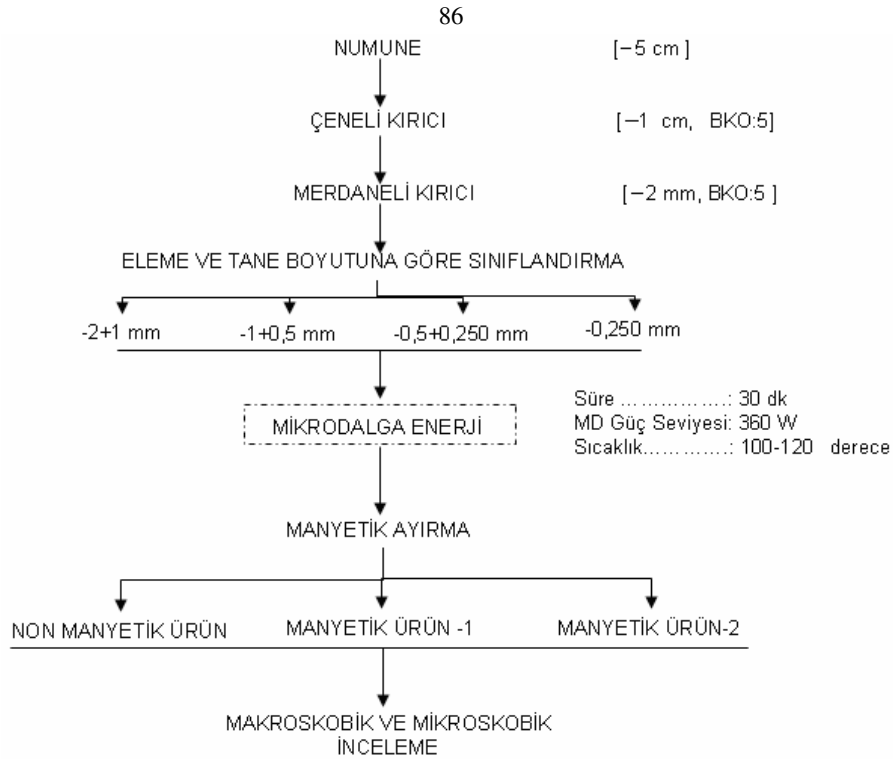


Şekil 3.31: Manyetik ayırma deneylerinde kullanılan yüksek alan şiddetli tek diskli elektromanyetik ayırıcı

Manyetik ayırma deneyleri öncelikle mikrodalga enerjiye maruz kalmamış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı manyetik ayırma deney şartlarında mikrodalga enerjiye maruz kalmış numunelerin manyetik ayırma deneyleri yapılarak, mikrodalga enerjinin numunelerin manyetik duyarlılıkları üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney koşulları Tablo 3.4’de verilmiştir. Elde edilen non manyetik ve manyetik ürünler üzerinde makroskobik ve mikroskobik inceleme de yapılarak, manyetik ürüne gelen tanelerin fiziki görünümüne bakılmıştır. Şekil 3.32’de deneysel akım şeması verilmiştir.

Tablo 3.4: Manyetik ayırma deney koşulları

Tane Boyutu..... : -2+1 mm Akım Şiddeti.....:1-2-3-4 amper Manyetik Alan:0,5-0,96-1,22-1,42 Tesla Disk yüksekliği...: 2 mm Besleme hızı... :10 gr/dk Bant Hızı: 3 m/dk Deney süresi.....:20 dk	Tane Boyutu..... : -1+0,5 mm Akım Şiddeti.....:1-2-3-4 amper Manyetik Alan:0,58-1,04-1,32-1,5 Tesla Disk yüksekliği...: 1,5 mm Besleme hızı... :6,7 gr/dk Bant Hızı: 3 m/dk Deney süresi.....:30 dk
Tane Boyutu..... : -0,5+0,250 mm Akım Şiddeti.....:1-2-3-4 amper Manyetik Alan...:0,7-1,1-1,46-1,64 Tesla Disk yüksekliği...: 1 mm Besleme hızı... :4,4 gr/dk Bant Hızı: 3 m/dk Deney süresi.....:45 dk	Tane Boyutu..... : -0,250 mm Akım Şiddeti.....:1-2-3-4 amper Manyetik Alan...:0,7-1,1-1,46-1,64 Tesla Disk yüksekliği...: 1 mm Besleme hızı... :4,4 gr/dk Bant Hızı: 3 m/dk Deney süresi.....:45 dk



Şekil 3.32: Manyetik ayırma deneysel akım şeması

3.3.4 Elektrostatik Ayırma Deneyleri

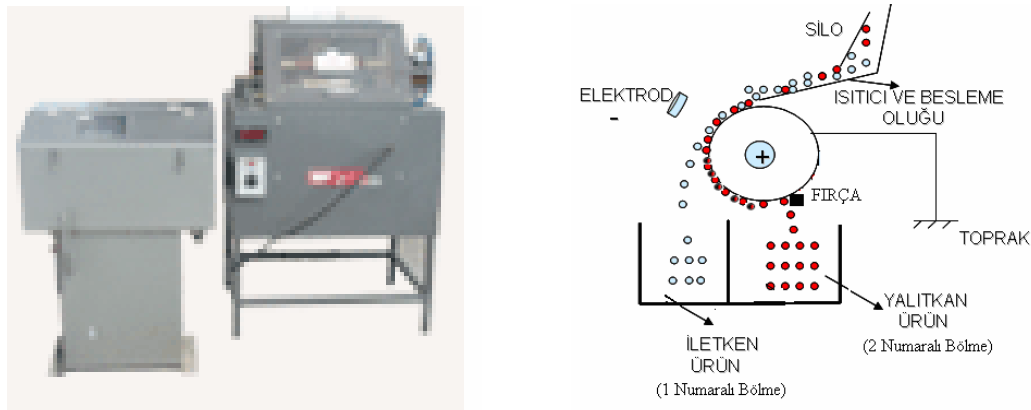
3.4.4.1 Temel Bilgiler

Cevheri oluşturan mineral tanelerin sahip oldukları iletkenlik farkına dayanan ve kuru olarak uygulanan cevher zenginleştirme yöntemine elektrostatik ayırma denmektedir. Elektrostatik ayırma işleminde, mineral taneleri bir elektrik alana girdiklerinde elektron kazanır veya kaybederler. 18 kV'un üzerindeki gerilimlerde gaz iyonu bombardımanı şeklinde bir yükleme olmaktadır. Bu sebepten iletken taneler kolaylıkla elektronlarını tambura ileterek yüksüz olarak parabolik bir yörünge takip ederken, yalıtkan özellik gösteren taneler ise aldıkları elektronları tambura iletemedikleri için tambura yapışık olarak hareket etmekte, elektrik alanın etkisinden çıktıktan sonra ya kendiliklerinden düşerek veya tambura yerleştirilen bir fırça vasıtası ile tamburdan ayrılmaktadırlar[162].

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| -Uygulanan elektriksel gerilim, | -Elektrodun tambura olan uzaklığı |
| -Tambur dönüş hızı, | -Ayırıcı bıçakların konumu, |
| -Numune besleme hızı, | -Beslenen numunenin sıcaklığı. |

Yaşar (1994), yaptığı tez çalışmasında bor minerallerinin elektrostatik özelliklerini incelemiş, üleksitin oda sıcaklığında iletken özellik gösterdiğini fakat ısıl gerilimler altında yaklaşık 80 °C sıcaklıklarda üleksit mineralinin yalıtkan özellik gösterdiğini belirtmiştir. Yine aynı çalışmada kolemanitin ise yalıtkan özellik gösterdiğini deneyler ile ortaya konmuştur. Kolemanitin ısıl gerilimler altında ise bir değişim göstermediği yapılan deneylerde ortaya konmuştur. Ancak kolemanit bünyesinde karbon olması durumunda ise hem iletken hem de yalıtkan davranış gösterdiği de bu çalışmada vurgulanmıştır[151].

Yapılan deneylerde tambur dönüş hızı, numune besleme hızı, elektrodun tambura olan uzaklığı ve ayırıcı bıçakların konumu sabit tutularak uygulanan gerilim ve numune sıcaklığının ayırma koşullarına etkisi araştırılmıştır. Şekil 3.33’de deneyde kullanılan elektrostatik ayırıcının resmi ve basit şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.33: Deneylerde kullanılan elektrostatik ayırıcının resmi ve basit şematik diyagramı

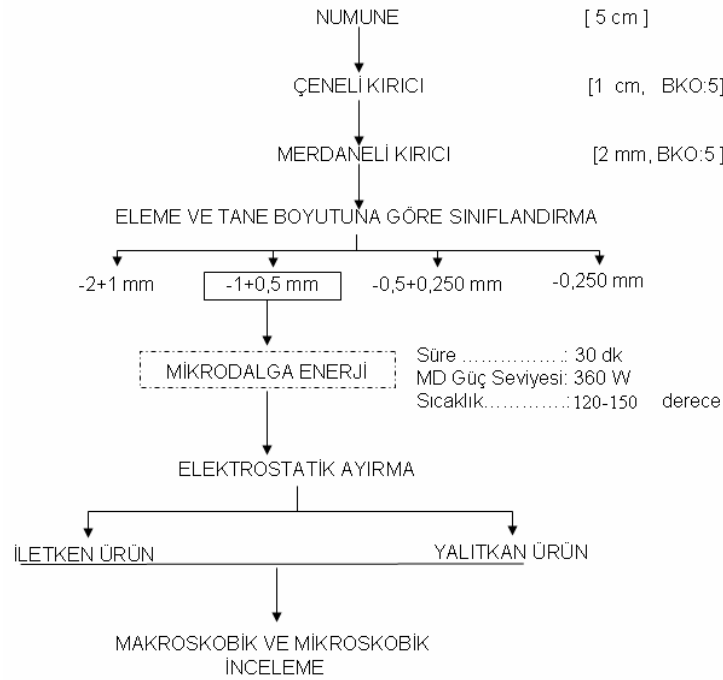
3.4.4.2 Malzeme

Deneylerde -1 +0,5 mm tane boyutunda sınıflandırılmış ve 60 °C’de nemi uzaklaştırılmış, %96,79 saflıkta kolemanit ve %99,95 saflıkta üleksit mineralleri kullanılmıştır.

3.4.4.3 Yöntem

Mikrodalga enerjiye maruz kalan kolemanit ve üleksit mineralinin elektrostatik özelliklerindeki değişimi tespit edebilmek için 22 kV’a kadar gerilim oluşturulabilen bir elektrostatik ayırıcıda deneyler gerçekleştirilmiştir.

Cihazın kalibrasyonu ve optimum çalışma koşullarını belirlemek için iletkenlik özellik gösteren galen ve yalıtkanlık özellik gösteren kuvars numuneleri kullanılmıştır. Bu örnekler üzerinde yapılan deneylerde ayırıcı bıçakların konumu ayarlanarak sabitlenmiştir. Titreşimli besleme oluğu da 100 gr malzemeyi 6 dakikada besleyecek şekilde ayarlanmıştır. Deneysel çalışma akım şeması Şekil 3.34’de verilmiştir.



Şekil 3.34: Elektrostatik ayırma deneysel akım şeması

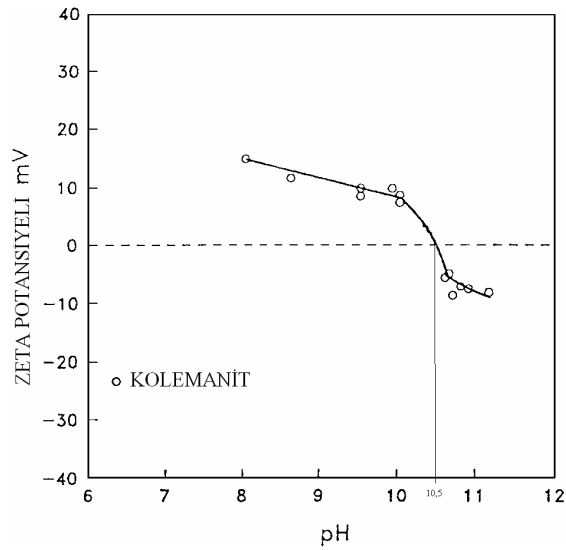
3.3.5 Flotasyon Deneyleri

3.3.5.1 Temel Bilgiler

Kolemanit flotasyonu konusunda pek çok araştırma yapılmıştır. Kolemanit minerali katyonik ve anyonik kollektörlerin her ikisi ile de kolaylıkla flote edilebilir. Kolemanit bünyesinde bulunan arsenik ve kil mineralleri kolemanit flotasyonunu olumsuz yönde etkilemektedir [145-146-147-148-149].

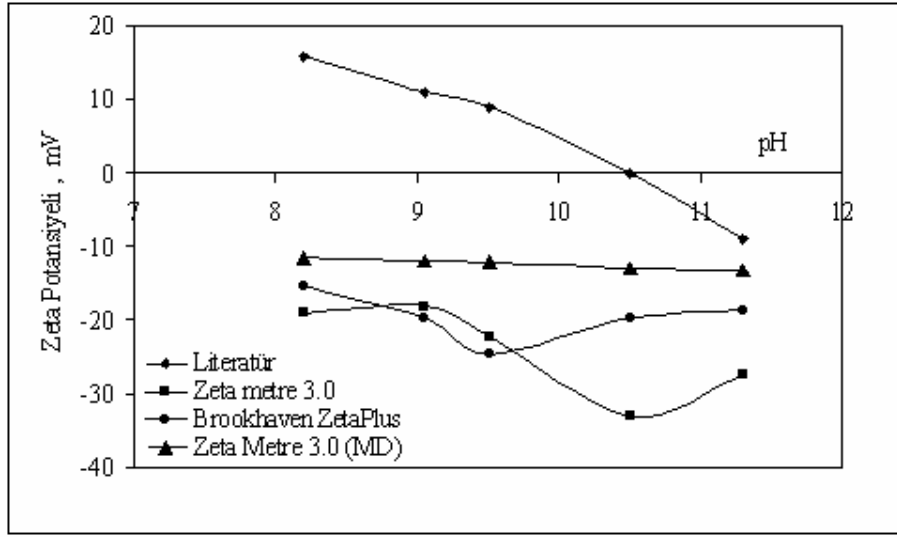
Kolemanit diğer hidrate bor mineralleri gibi tampon pH'ya sahiptir ve asit baz reaksiyonları sonucunda pH 9,3'e ulaşır [151]. Kolemanitin doğal pH'sı 9-9,5 arasındadır.

Yapılan bu çalışmalara genel olarak baktığımızda; Kolemanitin sıfır yük noktasının pH 10,5 civarında olduğu görülmektedir. Şekil 3.35'de kolemanit mineralinin değişik pH'larda ölçülmüş zeta potansiyel değerleri verilmiştir [148-151]. Sıfır yük noktasının altındaki pH değerlerinde kolemanitin yüzey yükü pozitif, üzerindeki pH larda ise yüzey yükü negatiftir. Dolayısıyla pH 10,5'un altında anyonik kollektörler ile çalışılırken pH 10,5'un üzerinde katyonik kollektörler etkili olmaktadır[148-151].



Şekil 3.35: Kolemanit mineralinin zeta potansiyel eğrisi[148]

Bu tez çalışmasında flotasyon deneyleri sadece kolemanit numunesi üzerinde yürütüldüğünden ve kullanılması düşünülen kolektör tipinin tam olarak saptanabilmesini teminen, Bigadiç yöresi kolemanit kristallerinin saf olarak farklı pH değerlerinde ve farklı zeta metre cihazları kullanılarak zeta potansiyel değerleri ölçülmüş ve literatürdeki değerler ile karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca mikrodalga enerjisine maruz bırakılmış saf kolemanit numunelerinin de aynı koşullarda zeta potansiyelleri ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 3.36'da bir arada verilmiştir.



Şekil 3.36: Saf kolemanit numuneleri üzerinde yapılan zeta potansiyel ölçümleri

Şekil 3.36 incelendiğinde, literatürde pH 7-10,5 aralığında kolemanit yüzeylerinin pozitif elektrik yükü ile kaplandığı ve pH 10,5'dan sonra negatif değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Ancak, bu tez çalışmasında alınan saf kolemanit numunelerin zeta potansiyeli ölçümleri kontrollü olarak iki farklı zeta metre cihazı kullanılarak yapılmış ve bütün pH değerlerinde kolemanit yüzeyinin negatif elektrik yükü ile kaplandığı tespit edilmiştir. Bunun muhtemel nedeninin kolemanit kristali çatlaklarında ve az da olsa maden ocağındaki bol miktarda bulunan kil minerallerinin kolemanit yüzeyini kaplaması olabileceği tahmin edilmektedir.

Ayrıca mikrodalga enerjiye maruz bırakılan kolemanit kristalinin zeta potansiyel değerlerinin denenen bütün pH değerlerinde kararlı bir hal aldığı ve negatif değerlere sahip olduğu saptanmıştır.

Genel olarak kolemanit flotasyonunda kullanılan reaktifler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

Anyonik kollektörler; sodyum dodesil benzen sülfonat, sodyum oleat, potasyum etil ksantat ve potasyum amil ksantat, naftanik asit.

Kasyonik kollektörler; dodesil amin hidroklorit ,

Non iyonik kollektörler; gaz yağı ve fuel oil.

pH ayarlayıcılar; HCl ve NaOH,

kolemaniti canlandırmak için; baryum klorür, kil mineralleri ve kalsiti bastırmak için sodyum silikat kullanılabilmektedir [147-164].

3.3.5.2 Malzeme

Flotasyon deneylerinde teze konu olan Bigadiç yöresi Tülü açık ocağından tüvenan olarak ayrıca temin edilen temsili kolemanit cevheri kullanılmıştır. Orijinal numunenin kimyasal analizi Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5: Tüvenan kolemanit kimyasal analizi

Bileşen	B ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	SiO ₂	SO ₄	SrO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	As ppm	Ateş zaiyatı
% miktar	27,02	29,18	0,16	1,27	2,95	0,26	0,09	0,08	0,012	3,030	37,90

Daha önceki çalışmalarda serbestleşme tane boyutu -250 mikron olarak saptandığından kırma ve öğütme ile tamamı 250 mikron altına indirilen kolemanit cevheri deneylerde kullanılmak üzere 250’şer gram olarak poşetlere ayrılmıştır.

3.3.5.3 Yöntem

Bu aşamadaki deneylerde mikrodalga enerjinin kolemanit mineralinin yüzeyinde nasıl bir değişim yaptığı ve bu değişimin kolemanitin flotasyonuna varsa etkisi araştırılmıştır. Öncelikle orijinal numune üzerinde bir dizi deney yapılmış ve fiziksel faktörlerin kolemanit flotasyonuna etkisi araştırılmıştır. Deneylerde ayırma parametreleri olarak karıştırma şiddeti, hava akış miktarı ve pülpte katı oranı esas alınmış, bu parametrelerin konsantre B₂O₃ % tenör ve B₂O₃ % kazanma verimine etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır.

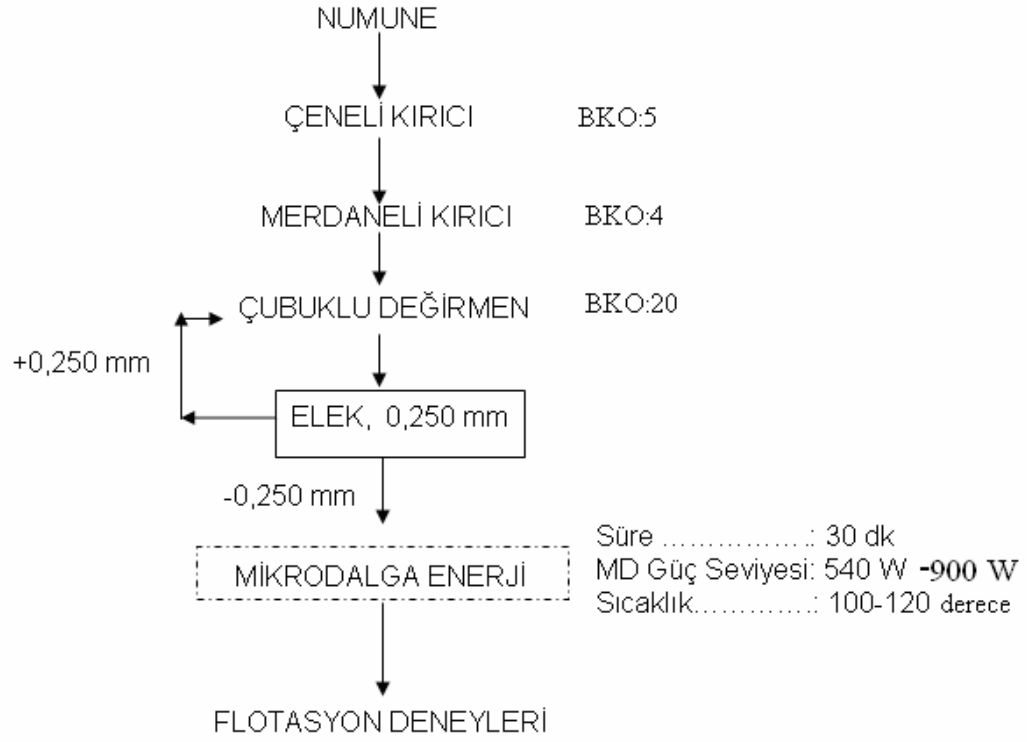
Deneylerde; karıştırma şiddeti 1000-1200-1400 d/dk, hava miktarı 1000-2000 cm³/dk ve selül hacmi 1-2 ve 4 lt olarak alınmıştır. Deneyler Denver laboratuvar tipi flotasyon makinesinde yapılmıştır. Numuneler şamlı ve şamsız olarak iki farklı yapıda flotasyon deneyine tabi tutulmuş, bu sayede dekantasyon yoluyla atılan yaklaşık 10 mikron tane boyutundaki şlamin da flotasyona etkisi incelenmiştir. Deneylerde anyonik flotasyon kolektörleri olan petrol sülfonat (Cytec R825) ve sulfosuccinamate (Cytec R845N) reaktiflerin belli oranlarda karıştırılarak kullanılmıştır. Deneyler doğal pH olan 9-9,5 civarında yapılmıştır.

Orijinal numune üzerinde yapılan deneylerden elde edilen optimum şartlar belirlendikten sonra, belli sürelerde mikrodalga enerjiye maruz bırakılmış örneklerin flotasyonu da yapılarak ikisi aradaki fark incelenmiştir. Deney koşulları aşağıda özetlenmiştir.

Deney Koşulları:

Numune miktarı.....	: 250 gr
Tane boyutu.....	: -250 mikron
pH değeri.....	: doğal pH (9-9,5)
Kollektör	: CYTEC AERO 825 PROMOTER : CYTEC 845N PROMOTER
Bastırıcı.....	: Sodyum silikat (Na ₂ SiO ₃)
Köpürtücü.....	: CYTEC 76 FROTHER (alkol tipi)
Pülpte katı oranı.....	: %20, %11 ve %6 (1-2-4 lt selül)
Karıştırma hızı.....	: 1000-1200-1400 d/dk
Hava miktarı.....	: 1000-1200-1700 cm ³ /dk
Kondüsyonlama süresi..	: 10 dk
Flotasyon süresi	: 10 dk

Deneysel akım şeması Şekil 3.37' da deneylerde kullanılan flotasyon cihazı ise Şekil 4.38'de verilmiştir.



Şekil 3.37 Flotasyon deneyleri akım şeması



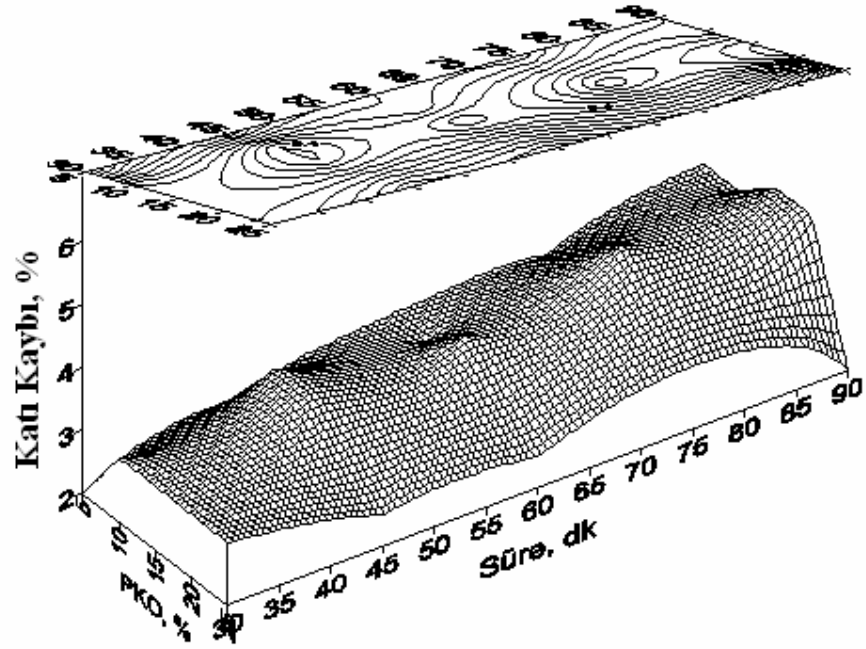
Şekil 3.38: Deneylerde kullanılan flotasyon cihazı

4. BULGULAR

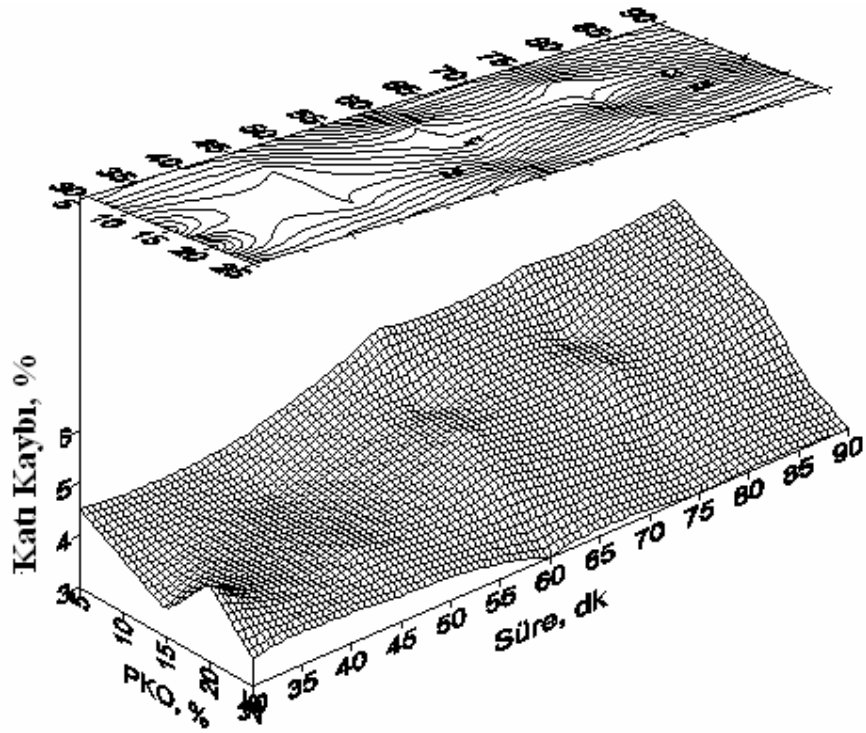
4.1. ÇÖZÜNÜRLÜK DENEYLERİ

Mikrodalga işlem görmemiş orijinal kolemanit ve üleksit numuneleri üzerinde yapılan suda çözünürlük deneylerinde pülpte katı oranı, çözünme süresi ve sıcaklık parametrelerinin %katı kaybı cinsinden çözünürlüğe olan etkisi araştırılmıştır. Oda sıcaklığı (22 °C), 45 °C ve 60 °C’de farklı pülpte katı oranı (%5, %10, %15, %20 ve %25) ve farklı sürelerde (30dk, 45dk, 60dk, 75dk ve 90dk) yapılan çözündürme deneylerinden elde edilen veriler EK B1’de ve bu verilerden yola çıkılarak oluşturulan grafikler ise kolemanit ve üleksit mineralleri için sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6’da verilmiştir.

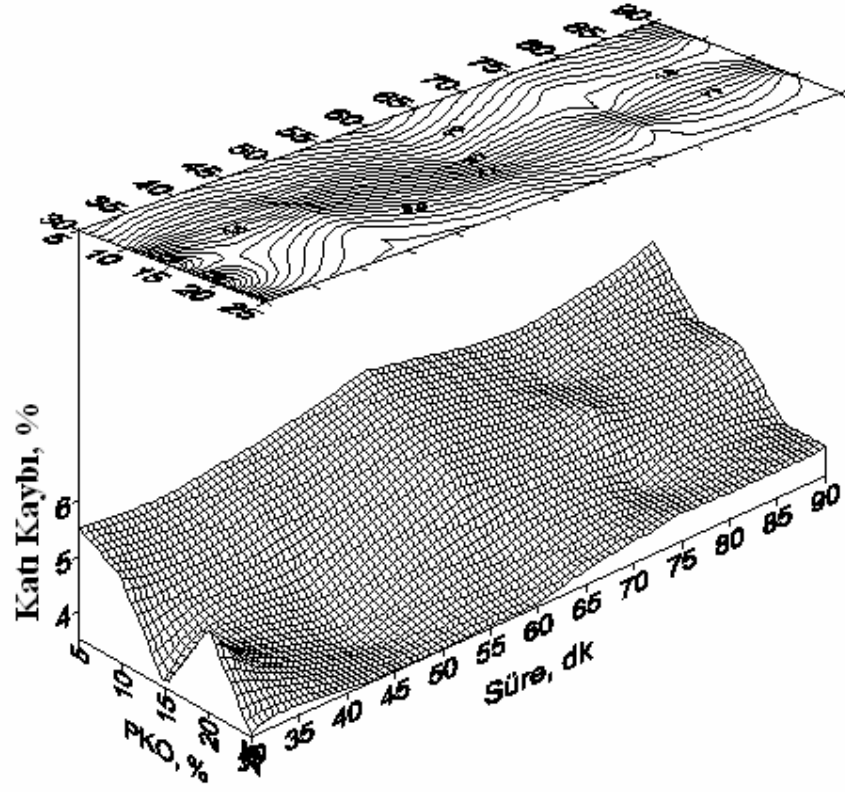
Surfer for Windows programı kullanılarak çizilen ve eşyükselti eğrileri içeren üç boyutlu (aynı anda iki değişkenin bir ve birden fazla sonuç üzerindeki etkisi) grafikler ile hidrate bor minerallerinin sudaki çözünürlüklerinin % katı kaybı cinsinden pülpte katı oranı ve çözünme süresine bağlı olarak değişimi kolaylıkla incelenebilmektedir.



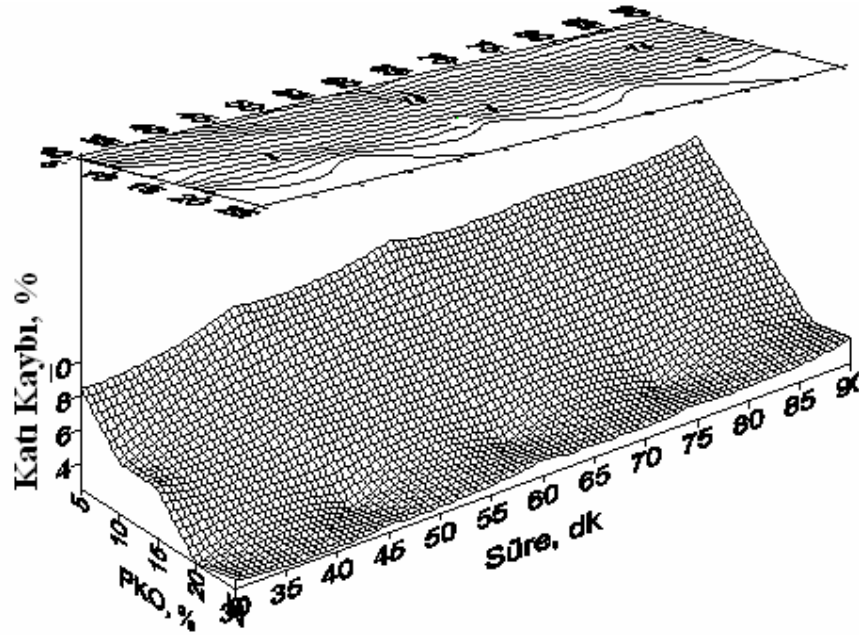
Şekil 4.1: K Colemanit için oda sıcaklığındaki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri



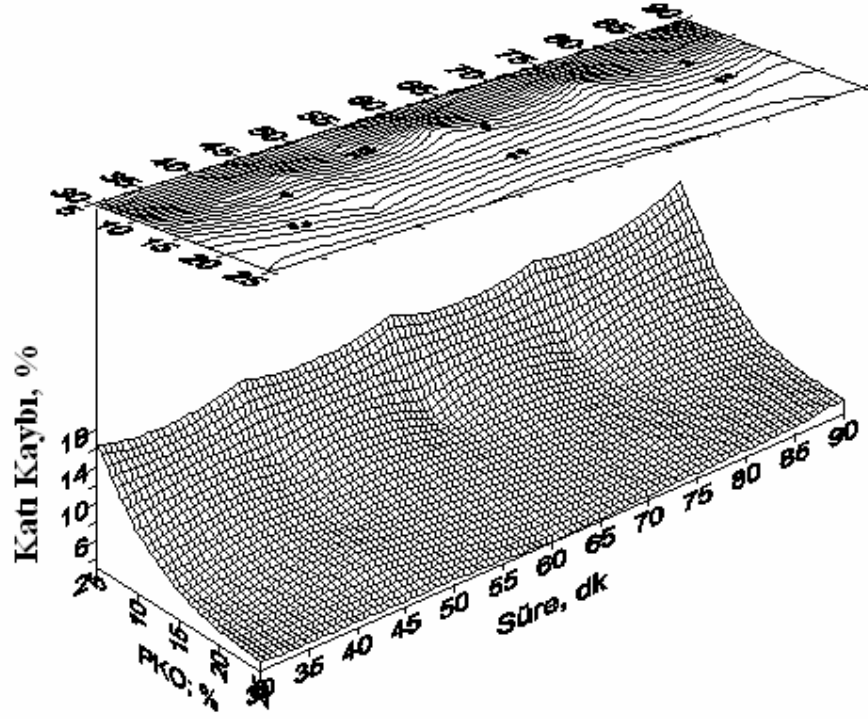
Şekil 4.2: K Colemanit için 45 °C'deki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri



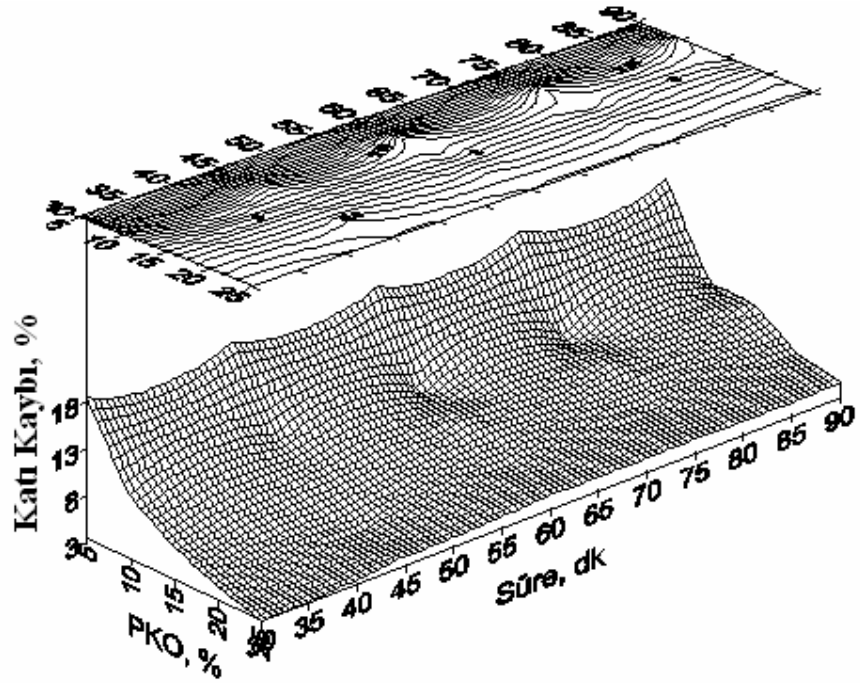
Şekil 4.3: Kolemant için 60 °C'deki süre ve pülpte kıy oranına bağılı olarak elde edilen çözünürlük değeri



Şekil 4.4: Üleksit için oda sıcaklığındaki süre ve pülpte kıy oranına bağılı olarak elde edilen çözünürlük değeri



Şekil 4.5: Üleksit için 45 °C'deki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri

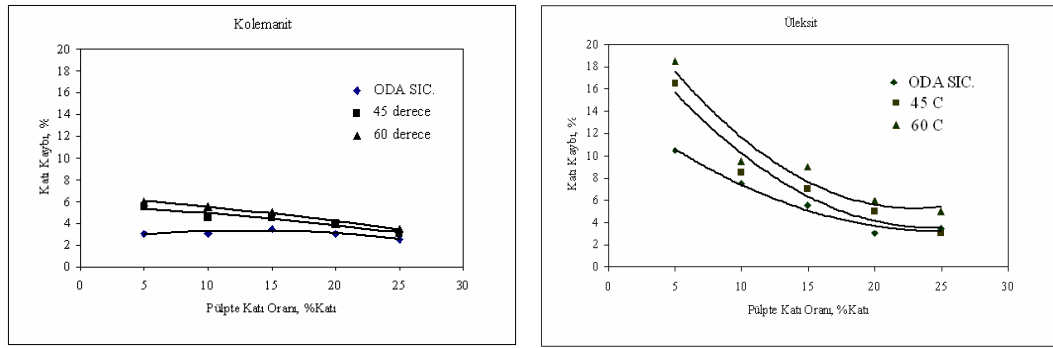


Şekil 4.6: Üleksit için 60 °C'deki süre ve pülpte katı oranına bağlı olarak elde edilen çözünürlük değerleri

Oluşturulan üç boyutlu grafikler incelendiğinde; kolemanitin sudaki en yüksek çözünürlük % katı kaybının; %5 pülpte katı oranı ve 60 °C pülp sıcaklığı ile 60 dakika çözünme süresinde %6 olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Üleksite ait grafikleri incelediğimizde de sudaki en büyük çözünürlük %katı kaybının %5 pülpte katı oranı, 60 °C pülp sıcaklığı ve 30 dakika çözünme süresinde %18,5 olarak elde edildiği tespit edilmiştir.

Kolemanit ve üleksit için farklı sıcaklıklarda pülpte katı oranı artışına bağlı olarak 60 dakika çözünme süresindeki çözünürlük %katı kayıpları değerleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



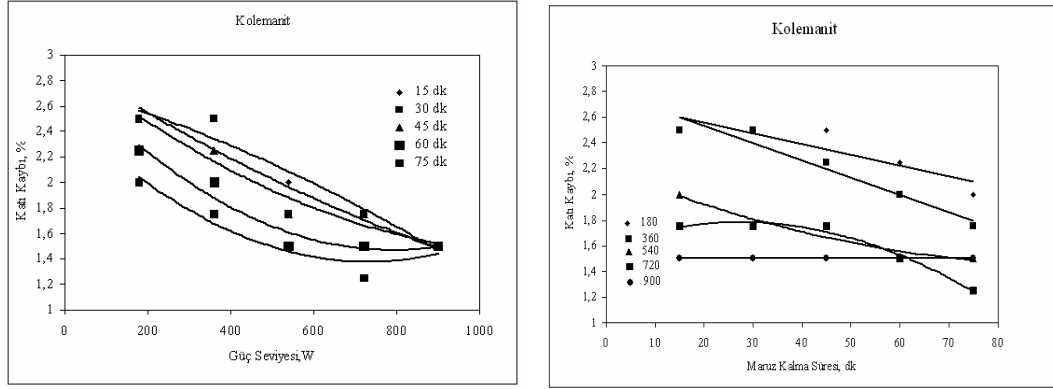
Şekil 4.7: Kolemanit ve üleksit minerallerinin 60 dk sabit çözünme süresinde farklı pülpte katı oranı ve farklı sıcaklıklardaki çözünürlük değerleri

Şekil 4.7’yi incelediğimizde; normal şartlarda yapılan çözünürlük deneylerinde sıcaklık artışına bağlı olarak hem kolemanit hem de üleksit numunelerinin çözünürlük % katı kayıpları artmış, pülpte katı oranı artışına bağlı olarak da bir azalma eğilimi göstermiştir.

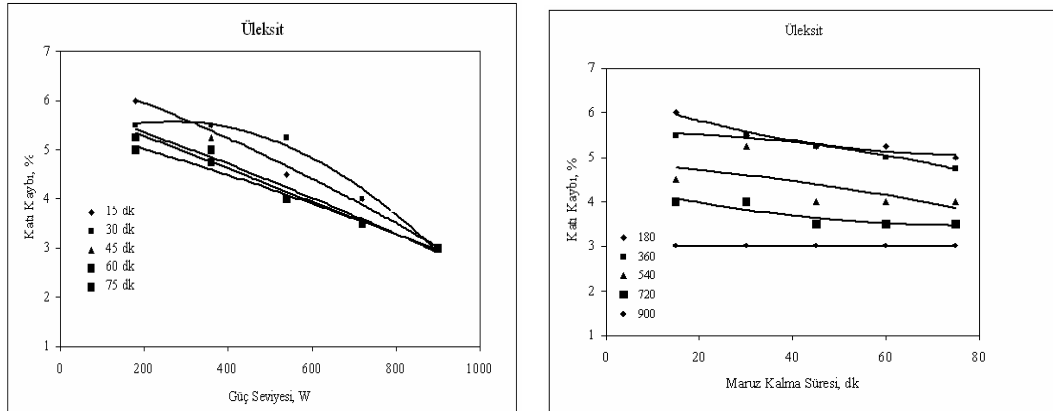
Mikroalgaya bağlı çözünürlük deneylerinde kolemanit ve üleksitin her birinden 20’şer gram numune ayrı ayrı 5 farklı mikrodalga güç düzeyinde 15 dk, 30 dk, 45 dk, 60 dk ve 75 dk süre ile mikrodalga enerjiye maruz bırakılmıştır. Her bir örnek mikrodalga fırından çıkartıldıktan sonra hemen tartılmış ve ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Buradan bünye suyunun hangi oranda uzaklaştığı da belirlenmeye çalışılmıştır. Havadan nem almayacak şekilde bir desikatörde soğutulan numuneler daha sonra

normal çözündürme deneyleri ile karşılaştırma yapılabilmek için seçilen %10 pülp te katı oranı, 60 dk çözündürme süresi ve normal su sıcaklığında sabit karıştırma hızı ile bir dizi çözündürme deneylerine tabi tutulmuşlardır.

Kolemanit ve üleksit mineralleri üzerinde yapılan mikrodalgaya bağlı çözünürlük deney sonuçları sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9’da verilmiştir.



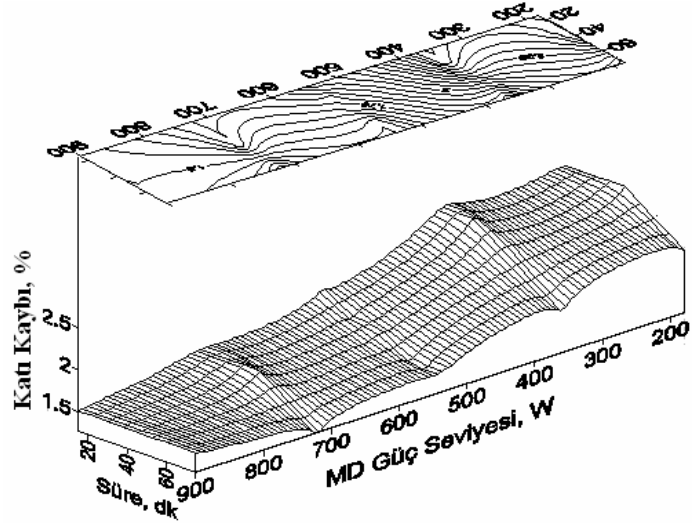
Şekil 4.8: Kolemanite ait mikrodalga güç seviyesi ve maruz kalma süresine bağlı çözünürlük deney sonuçları



Şekil 4.9: Üleksite ait mikrodalga güç seviyesi ve maruz kalma süresine bağlı çözünürlük deney sonuçları

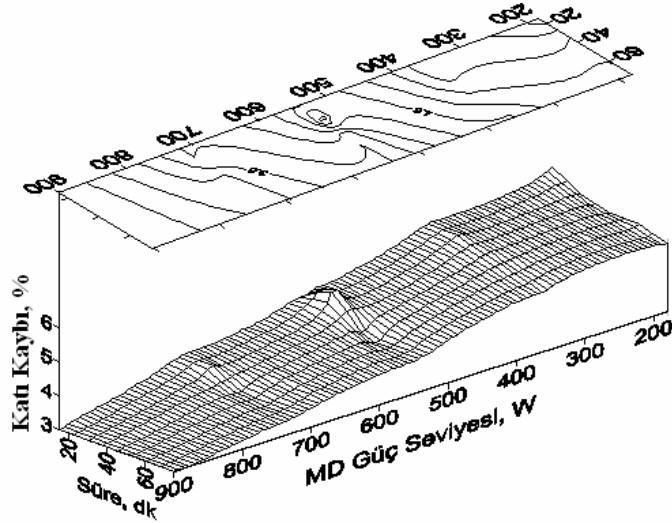
Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’u incelediğimizde; mikrodalga güç seviyesi arttıkça çözünürlüğe bağlı %katı kaybının azaldığı, uygulanan her bir güç seviyesinde mikrodalga enerjiye maruz kalma süresi arttıkça ise çözünürlüğe bağlı % katı kayıplarının yine bir miktar azaldığı görmekteyiz.

Yine mikrodalgaya bağı yapılan çözümdürme deneylerinden elde edilen veriler ile kolemanit ve üleksit için sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki Surfer grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.10: Kolemanitin mikrodalgaya bağı çözümlülük değeri

Kolemanite ait Surfer grafiğini incelediğimizde de numunelere uygulanan mikrodalga güç seviyesi ve her bir güç seviyelerindeki maruz kalma süresi arttıkça çözümlülük %katı kaybının büyük oranda azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.11: Üleksitin mikrodalgaya bağı çözümlülük değeri

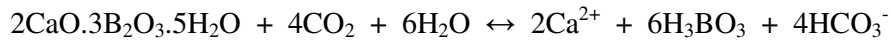
Üleksite ait Surfer grefiğini incelediğimizde de yine aynı şekilde kolemanitte olduğu gibi güç seviyesi ve maruz kalma süresinin artışına bağlı olarak çözünürlük % katı kayıpları büyük oranda azaldığı görülmektedir.

Orijinal numune ile mikrodalga enerjiye maruz kalmış numunenin çözünürlük değerlerinin mukayesesinin edilebilmesi için baz alınan çözündürme şartları; %10 pülp te katı oranı, 60 dk çözündürme süresi ve normal su sıcaklığıdır. Bu şartlarda yapılan deneylerde kolemanit ve üleksitin çözünürlük % katı kaybı değerleri sırası ile %3 ve %7,5 olarak gerçekleşmiştir. Aynı çözündürme şartlarında farklı mikrodalga enerji seviyelerine maruz kalmış numunelerin yapılan çözündürme deneylerinde elde edilen en düşük çözünürlük % katı kaybı değerleri kolemanit ve üleksit mineralleri için sırası ile %1,25 ve %3 olmuştur. Bu değerler kolemanit için en düşük 720 W mikrodalga güç seviyesi ve 75 dk maruz kalma süresinde elde edilirken, üleksit için ise yine en düşük 900 W mikrodalga güç seviyesi ve 15 dk maruz kalma süresinde elde edilmiştir.

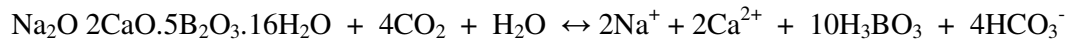
Mikrodalga enerjiye maruz bırakılan kolemanit ve üleksitin numunelerinin, ısıya bağlı olarak bünyelerinde meydana gelen yapısal değişimler nedeniyle çözünürlüklerinde ısıya maruz kalmamış olan numunelere göre sırası ile %58 ve %60'a varan oranda bir azalma meydana geldiği yukarıdaki verilerden yola çıkılarak tespit edilmiştir.

Kolemanit ve üleksit mineralleri atmosfere açık sistemlerde su içerisinde aşağıdaki reaksiyonu vererek çözünmektedir [151].

Kolemanit:



Üleksit:

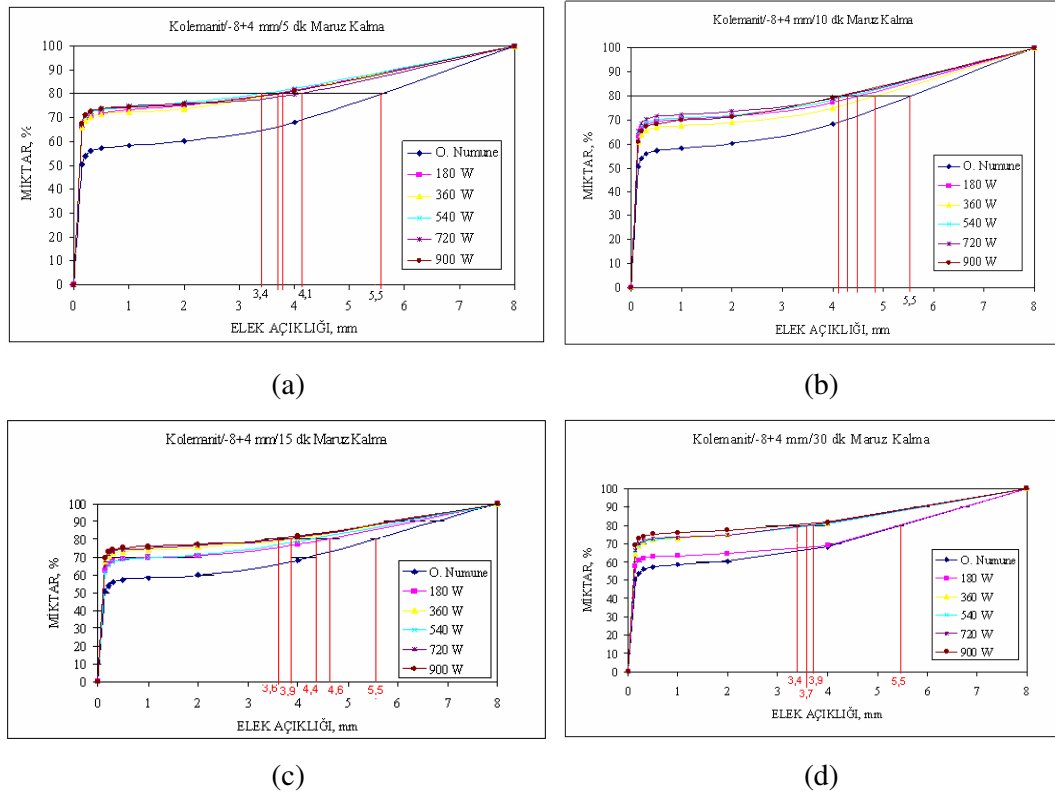


Sonuç olarak kolemanit ve üleksitin çözündürme deneyleri göstermiştir ki; hidrate bor minerallerinden olan kolemanit ve üleksit belli süreler ile uygulanan mikrodalga enerjinin etkisi ile kristal yapılarındaki suyu hızla kaybetmekte, böylelikle faz yapıları değişerek, sudaki çözünme oranları neredeyse yarı yarıya azalmaktadır.

4.2. ÖĞÜTME DENEYLERİ

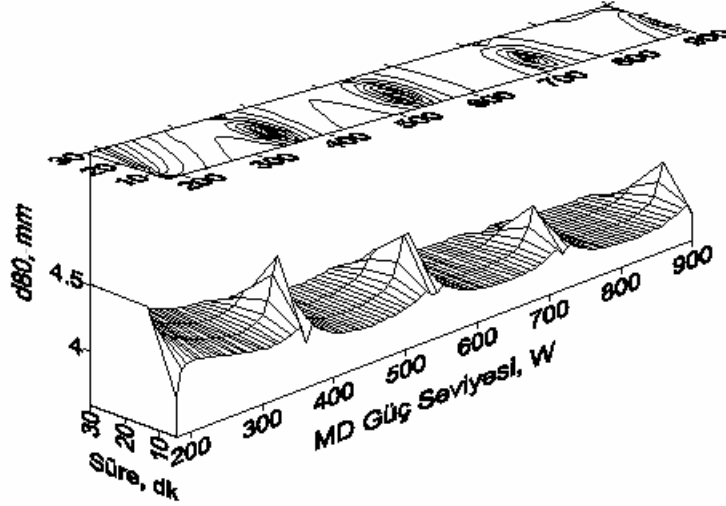
Mikrodalga enerjinin öğütmeye olan etkisini araştırmak için üç farklı tane boyutunda - 8mm+4mm, -4mm+2mm ve -2mm+1mm olarak sınıflandırılan kolemanit ve üleksit numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu arada tane boyutu küçüldükçe mikrodalga enerjinin etkisi de belirlenmeye çalışılmıştır.

Kolemanit minerali üzerinde -8+4 mm tane boyutunda yapılan öğütme deneylerinde hazırlanan 100'er gramlık numuneler her bir güç seviyesinde 5dk, 10 dk, 15 dk ve 30 dk mikrodalga enerjiye maruz bırakılmışlardır. Mikrodalga fırının çalışması esnasında döner tepsi dairesel bir hareket yapmakta ve enerjinin malzeme tarafından homojen olarak absorblanmasını sağlamaktadır. Mikrodalga fırından çıkan ürün porselen değirmende öğütme süresi 15 dk olacak şekilde boyut küçültmeye tabi tutulmuştur. Öğütülmüş numuneler elek analizine tabi tutularak elde edilen veriler EK C1, C2, C3 ve C4'de verilmiş, kümülatif elek altı eğrileri ise Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Farklı güç seviyelerinde a)5, b)10, c)15, d)30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri.

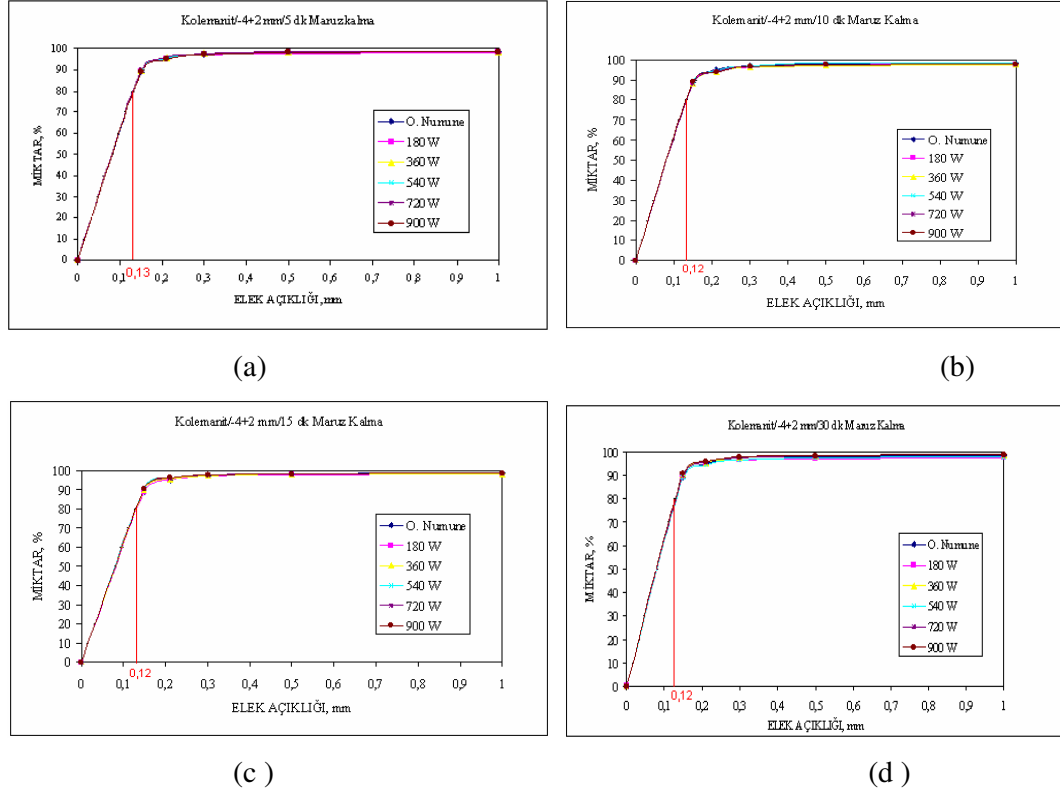
-8+4 mm tane boyutuna farklı güç seviyeleri ve farklı maruz kalma zamanlarında yapılan deneylerden elde edilen tüm verilerden yola çıkılarak Şekil 4.13'deki Surfer grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 4.13: -8+4 mm tane boyutundaki kolemanitin mikrodalgaya bağlı d_{80} boyutu değişimi

-8+4 mm tane boyutuna uygulanan öğütme deneylerinde öncelikle orijinal kolemanit numunesi üzerinde çalışılmış, mikrodalga enerjiye bağlı deneylerden elde edilecek sonuçları karşılaştırma yapabilmek için referans değerler elde edilmiştir. Orijinal numunenin kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde d_{80} tane boyutunun 5,5 mm olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.12'deki verileri incelediğimizde mikrodalga enerjiye farklı süreler ile maruz kalmış örneklerin d_{80} tane boyutlarında 3,4 mm seviyelerine kadar bir azalma göze çarpmaktadır. Bu orijinal numuneye göre d_{80} tane boyutunda %38,20 oranında bir azalmayı ifade etmektedir. Yine EK C1, C2, C3 ve C4'deki elek analiz verilerini incelediğimizde -0,150 mm tane boyutu altına inen malzeme miktarlarında da orijinal numuneye göre büyük artışlar olmuştur. Örneğin orijinal numunenin -0,150 mm tane boyutundaki malzeme miktarı %50,40 iken 540 W güç seviyesi 10 dk maruz kalma süresinde bu miktar %64,41, 900 W güç seviyesi 30 dk maruz kalma süresinde ise %69,16 ya çıkmıştır. -0,150 mm tane boyutu altına inen malzeme miktarlarında orijinal numuneye göre yaklaşık %20'lik bir artış söz konusu olmuştur. Bu deneylerden kolemanitin öğütülebilirliğinin artan güç seviyesine paralel olarak arttığı tespit edilmiştir.

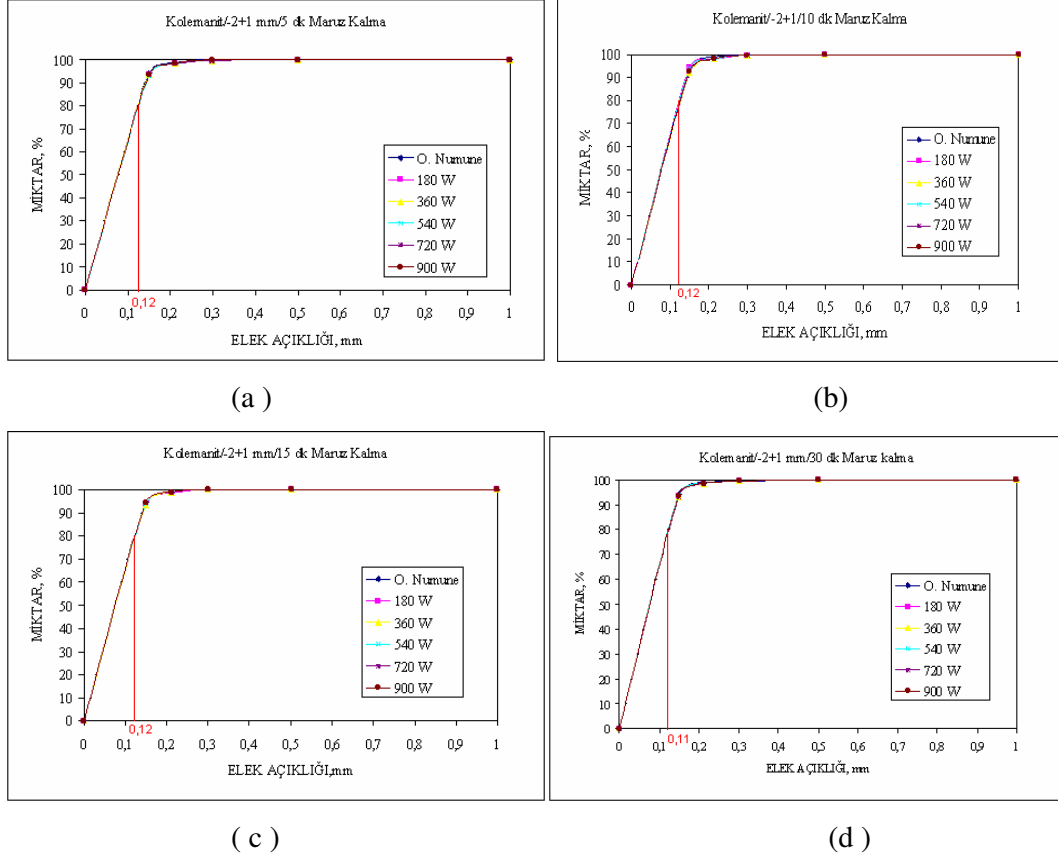
Bir alt grup olan -4+2 mm tane boyutundaki kolemanit mineralinin farklı güç seviyelerinde 5 dk mikrodalga enerjiye maruz kalması sonrasında yapılan öğütme deneylerinden elde edilen numunelerin yapılan elek analiz sonuçları EK C5, C6, C7 ve C8’de verilmiş, oluşturulan grafikler ise Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Farklı güç seviyelerinde a)5, b)10, c)15, d)30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri

-4+2 mm tane boyutu grubundaki kolemanit numunelerinin farklı güç seviyeleri ve maruz kalma sürelerindeki tüm deneylerinden elde edilen verilerini incelediğimizde; kümülatif elek altı eğrilerinin üst üste çakıştığı bu yüzden d_{80} tane boyutu değişimlerinin net olarak görülemediği, EK C5, C6, C7 ve C8’deki elek analiz değerlerini incelediğimizde ise -0,150 mm tane boyutu altına geçen miktarlarda da büyük bir farkın olmadığı görülmektedir; orijinal numune için bu %89,19 iken, 30 dk maruz kalma süresinde 180 W’da %89,10 ; 360 W’da %90,57; 540 W’da %89,08 ; 720 W’da %90,17 ve 900 W’da %90,86 olarak elde edilmiştir.

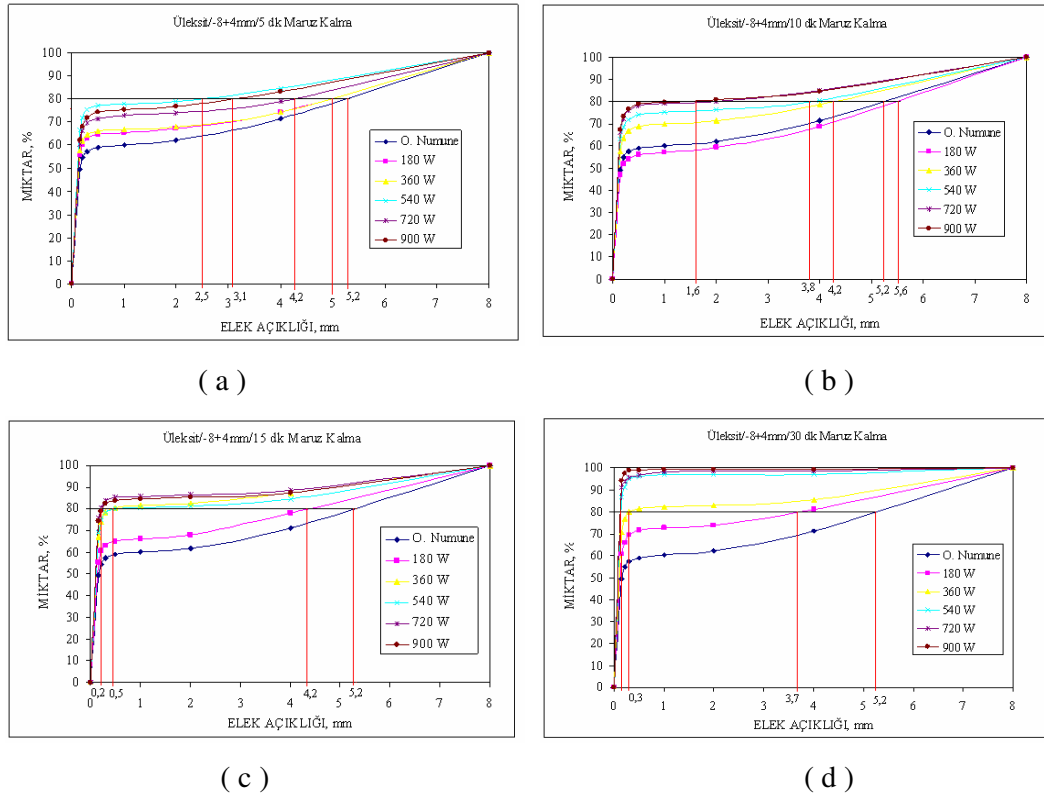
Bir alt grup olan -2+1 mm tane boyutundaki kolemanit mineralinin farklı güç seviyelerinde 5 dk mikrodalga enerjiye maruz kalması sonrasında yapılan öğütme deneylerinden elde edilen numunelerin yapılan elek analiz sonuçları EK C9, C10, C11 ve C12’de verilmiş, kümülatif elek altı eğrileri ise Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Farklı güç seviyelerinde a)5, b)10, c)15, d)30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri

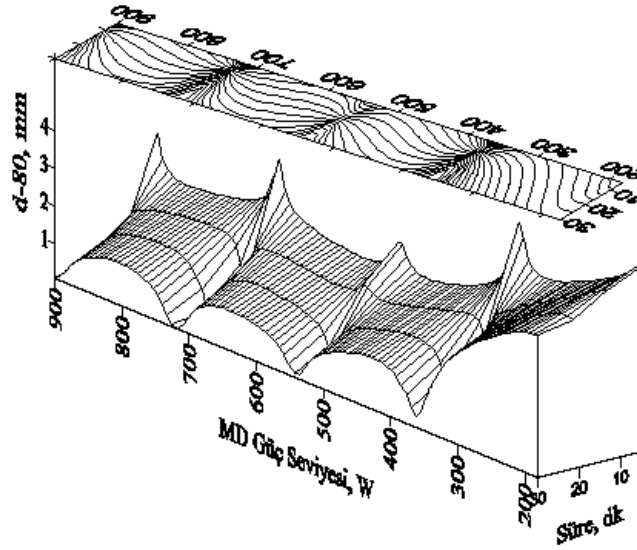
-2+1 mm tane boyutu grubundaki kolemanit numunelerinin de yapılan tüm öğütme deneylerini incelediğimizde d_{80} tane boyutu değişimlerinin net olarak görülemediği, EK C9, C10, C11 ve C12’deki elek analiz değerlerini incelediğimizde ise -0,150 mm tane boyutu altına geçen miktarlarda da büyük bir farkın olmadığı görülmektedir; orijinal numune için bu %94,15 iken, 15 dk maruz kalma süresinde 180 W’da %93,62 ; 360 W’da %93,62; 540 W’da %93,92; 720 W’da %94,25 ve 900 W’da %94,21 olarak elde edilmiştir. Mikrodalga enerjinin kolemanitin öğütülebilirliğine olan etkisini öğütme sonrası elde edilen ürün tane boyutunun çok ince olmasından dolayı net olarak görmek mümkün olmamıştır.

Üleksit minerali üzerinde daha önce hazırlan üç farklı tane boyutundaki 100'er gramlık her bir mikrodalga güç seviyesinde 5dk, 10 dk, 15 dk ve 30 dk mikrodalga enerjiye maruz bırakılmışlardır. Mikrodalga ön işleminden sonra yapılan öğütme deneylerinde kolemanit numunesine uygulanan öğütme şartları aynen üleksit içinde uygulanmıştır. Öğütme sonrası ürün kuru olarak elemeye tabi tutulmuş elde edilen verilerden Tablo ve grafikler oluşturularak mikrodalga enerjinin üleksitin öğütülebilirliğine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. İlk aşamada -8+4 mm tane boyutundaki üleksit mineralinin farklı güç seviyelerinde 5-10-15 ve 30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalması sonrasında yapılan öğütme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen öğütülmüş ürünün yapılan elek analiz sonuçları EK C1, C2, C3 ve C4'de verilmiş, numunelerin kümülatif elek altı eğrileri ise Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16: Farklı güç seviyelerinde a)5, b)10, c)15, d)30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri.

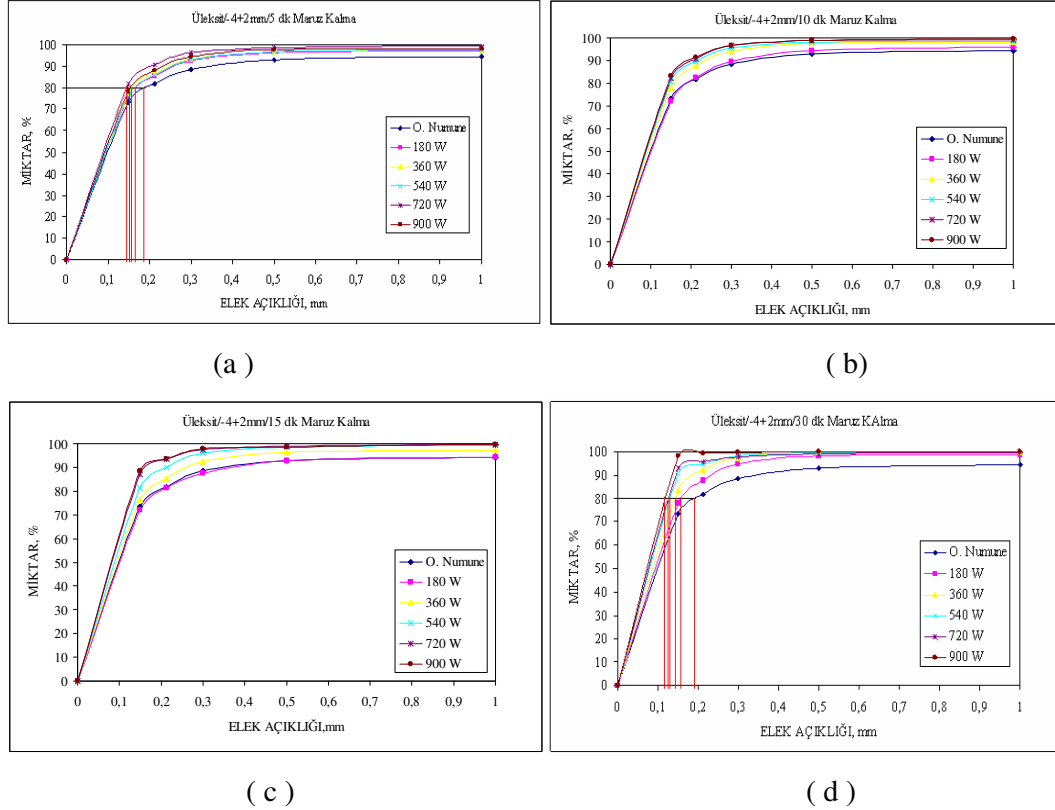
-8+4 mm tane boyutundaki üleksit minerali üzerinde farklı mikrodalga güç seviyeleri ve farklı maruz kalma sürelerinde yapılan deneylerden elde edilen tüm veriler ile Şekil 4.17'deki Surfer grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 4.17: -8+4 mm tane boyutundaki üleksitin mikrodalgaya bağlı d_{80} tane boyutu değişimi

-8+4 mm tane boyutuna uygulanan öğütme deneylerinde orijinal üleksit numunesi üzerinde yapılan elek analizi sonucunda d_{80} tane boyutunun 5,2 mm olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.16'daki verileri incelediğimizde mikrodalga enerjiye farklı süreler ile maruz kalmış örneklerin d_{80} tane boyutlarında 5 dk maruz kalma süresinde 2,5 mm'ye, 10 dk maruz kalma süresinde 1,6 mm'ye, 15 dk maruz kalma süresinde 0,2 mm'ye ve 30 dk maruz kalma süresinde minimum 0,15 mm'ye kadar düşmüştür. Bu orijinal numuneye göre d_{80} tane boyutunda %97 oranında bir azalmayı ifade etmektedir. Yine EK C1, C2, C3 ve C4'deki elek analiz verilerini incelediğimizde -0,150 mm tane boyutu altına inen malzeme miktarlarında da orijinal numuneye göre büyük artışlar olmuştur. Örneğin orijinal numunenin -0,150 mm tane boyutndaki malzeme miktarı %49,43 iken 540 W güç seviyesi 10 dk maruz kalma süresinde bu miktar %63,34 ve 900 W güç seviyesi 30 dk maruz kalma süresinde ise %94,34'e çıkmıştır. Orijinal numuneye göre yaklaşık %45'lik bir artış söz konusu olmuştur. Bu deneylerden üleksitin öğütülebilirliğinin artan güç seviyesine paralel olarak büyük oranda arttığı tespit edilmiştir.

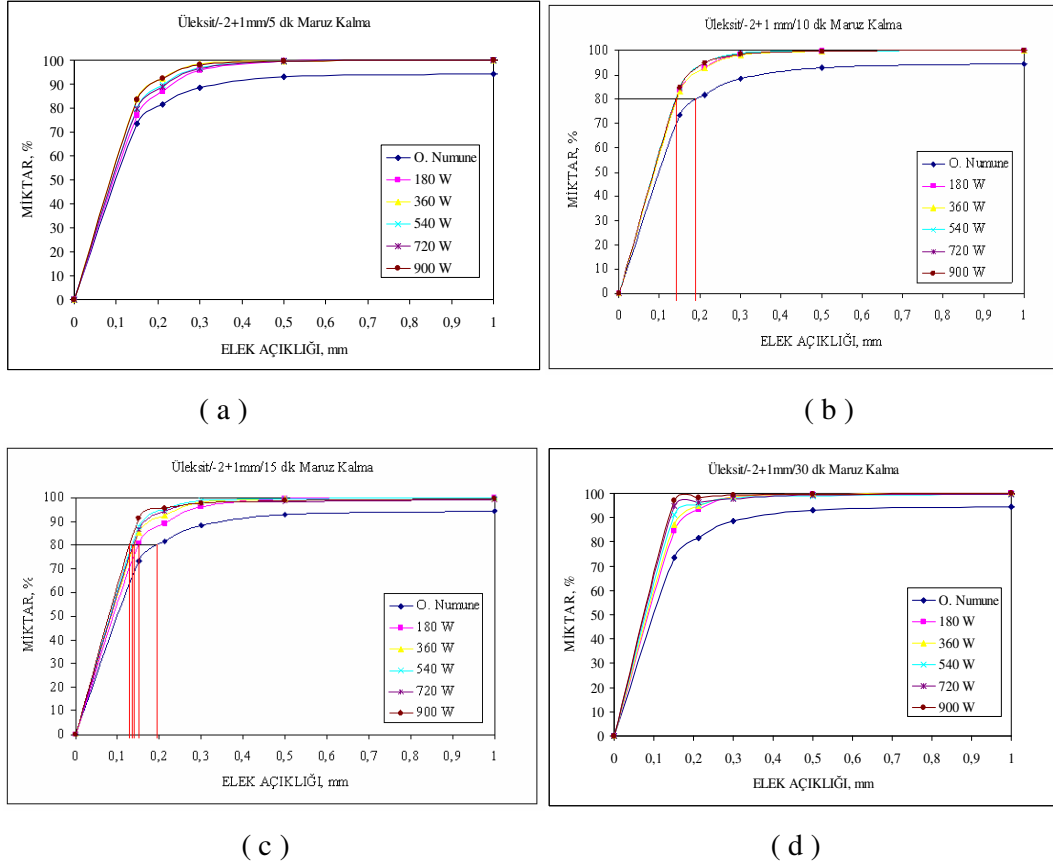
Bir diğer grup olan -4+2 mm tane boyutundaki üleksit mineralinin farklı güç seviyelerinde 5 dk mikrodalga enerjiye maruz kalması sonrasında yapılan öğütme deneylerinden elde edilen sonuçlar EK C5, C6, C7 ve C8’de verilmiş, numunelerin kümülatif elek altı eğrileri ise Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18: Farklı seviyelerinde a)5, b)10, c)15, d)30 dk mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri.

-4+2 mm tane boyutu grubundaki üleksit numunelerinin farklı güç seviyeleri ve maruz kalma sürelerindeki yapılan deneylerinden elde edilen verilerini incelediğimizde; kümülatif elek altı eğrilerinde çok azda olsa bir değişim gözlemlendiği d_{80} tane boyutunun artan güç seviyesine bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir. EK C5, C6, C7 ve C8’deki elek analiz değerlerini incelediğimizde ise -0,150 mm tane boyutu altına geçen miktarlarda da bir miktar artışın olduğu görülmektedir; orijinal numune için bu %73,39 iken, 30 dk maruz kalma süresinde 180 W’da %77,84; 360 W’da %83,45; 540 W’da %90,69 ; 720 W’da %93,06 ve 900 W’da %98,31 olarak elde edilmiştir. Maksimum %25 oranında bir artış sağlandığı belirlenmiştir.

Bir alt grup olan -2+1 mm tane boyutunda mikrodalgaya bağlı yapılan öğütme deneyleri sonrasında elde edilen sonuçlar EK C9, C10, C11 ve C12’de verilmiş, numunelerin kümülatif elek altı eğrileri ise Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19: Farklı güç seviyelerinde a)5, b)10, c)15, d)30 dk mikrodalgaya maruz kalan numunelerin kümülatif elek altı eğrileri

-2+1 mm tane boyutu grubundaki üleksit numunelerinin yapılan tüm öğütme deneylerini incelediğimizde d_{80} tane boyutu değişimlerin çok küçük de olsa görülebildiği, EK C9, C10, C11 ve C12’deki elek analiz değerlerini incelediğimizde ise -0,150 mm tane boyutu altına geçen miktarlarda da büyük bir farkın olmadığı görülmektedir; orijinal numune için bu %80,21 iken, 30 dk maruz kalma süresinde 180 W’da %84,60 ; 360 W’da %87,25; 540 W’da %89,02; 720 W’da %94,82 ve 900 W’da %97,18 olarak elde edilmiştir. Orijinal numuneye göre %17 oranında bir artış sağlanmıştır.

Genel olarak kolemanit ve üleksit için yapılan tüm öğütme deneyleri ve mikrodalgaya bağlı su kayıpları incelendiğinde, mikrodalga enerjisine bağlı olarak mineral bünyelerindeki su kayıp oranları arttıkça ninerallerin öğütülebilirliklerinde de önemli oranda artışların meydana geldiği tespit edilmiştir. Mikrodalgaya bağlı öğütme verileri incelendiğinde uygulanan en yüksek güç seviyesinde kolemanitin bünye suyunun ancak %20'si yani yaklaşık 1 molü uzaklaşmasına rağmen d_{80} tane boyutu 5,5 mm'den minimum 3,4 mm seviyelerine inmiştir. Üleksit için ise bünye suyu kaybı oranı yaklaşık %85 değerinde ki buda 7 mol suya karşılık gelmektedir, d_{80} tane boyutu 5,2 mm'den 0,15 mm'ye kadar incelmıştır.

4.3. MANYETİK AYIRMA DENEYLERİ

Akım Şiddeti;1-2-3-4 amper, manyetik alan büyüklüğü;0,5-0,96-1,22-1,42 Tesla, disk yüksekliği; 2 mm, besleme hızı;10 gr/dk, bant hızı; 3 m/dk, deney süresi; 20 dk olan deney şartlarında yapılan bir dizi uygulamadan elde edilen sonuçlar kolemanit ve üleksit için sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

-2+1 mm tane boyutunda yapılan manyetik ayırma deneylerinde hiçbir manyetik ürün alınamamıştır. Yapılan mikroskobik incelemede de bu boyut grubunda manyetik özellik gösterebilecek safsızlıkların olmadığı görülmüştür. Bu boyut grubunda disk yüksekliğine bağlı olarak manyetik alan şiddeti maksimum 1,42 Tesla olarak elde edilmiştir. Deney sırasında tanelerin düzenli ve tek bir tabaka oluşturacak bir şekilde manyetik alandan geçmesi sağlanarak birbirlerini olumsuz etkilemeleri önlenmiştir.

-1+0,5 mm tane boyutunda yapılan manyetik ayırma deneylerinde tane boyutuna bağlı olarak disk yüksekliği ayarlanarak manyetik alan şiddeti bir miktar daha arttırılabilmektedir. Buna rağmen 0,58 Tesla (1 Amper) manyetik alan büyüklüğünde manyetik ürün alınamamasına karşın diğer manyetik alan büyüklüklerinde çok düşük miktarlarda da olsa manyetik tanelerin disk tarafından toplanarak non-manyetik üründen ayrıldığı tespit edilmiştir. Manyetik ve non-manyetik ürün üzerinde yapılan mikroskobik incelemelerde; tanelerin büyük oranda koyu renkli ve az da olsa kolemanit bünyesine girmiş kahverengimsi demir oksit bileşenleri şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen manyetik ürün miktarı beslemeye göre oldukça küçüktür.

Tablo 4. 1: Kolemanit mineralinin (normal)manyetik ayırma deney sonuçları

TANE BOYUTU	MANYETİK ALAN Tesla	Many. Ürün Miktar(gr)		N-Many . Ürün Miktar(gr)	Deney Süresi dakika
		Y. M	D.M		
-2+1 mm (2 mm disk yük.)	0,50 (1 Amp.)	-	-	199,40	20
	0,96 (2 Amp.)	-	-	200,10	20
	1,22 (3 Amp.)	-	-	200,60	20
	1,42 (4 Amp.)	-	-	199,90	20
-1+0,5 mm (1,5 mm disk yük.)	0,58 (1 Amp.)	-	~0,01	200,60	30
	1,04 (2 Amp.)	-	~0,02	199,60	30
	1,32 (3 Amp.)	-	~0,05	199,10	30
	1,50 (4 Amp.)	-	~0,10	199,60	30
-0,5+0,250 mm (1 mm disk yük.)	0,70 (1 Amp.)	~0,01	~0,01	199,30	45
	1,1 (2 Amp.)	~0,01	~0,01	198,60	45
	1,46 (3 Amp.)	~0,01	~0,01	199,00	45
	1,64 (4 Amp.)	~0,01	~0,01	199,80	45
-0,250 mm (1 mm disk yük.)	1,64 (4 Amp.)	-	~0,01	196,70	45

-0,5+0,250 mm tane boyutunda yapılan deneylerde tane boyutuna bağlı olarak disk yüksekliği 1 mm olarak ayarlanmış ve buna bağlı olarak elde edilen manyetik alanlar akım şiddetine bağlı olarak bir miktar daha büyümüştür. Bu boyut grubuna yapılan deneylerde maksimum 1,64 Tesla büyüklüğünde bir manyetik alan elde edilebilmiştir. Disk mesafesinin azalması ile de manyetik çekim kuvvetinin tanelere etkiyen yerçekimi kuvvetini yenmesi daha da kolaylaştığı için disk ön tarafından besleme içerisinde bulunan yüksek manyetik duyarlılıktaki taneleri de yakalayabilmiştir. Böylelikle iki farklı manyetik ürün alınmıştır. Yapılan mikroskobik incelemelerde de yine aynı şekilde demiroksit ile boyanmış kolemanit taneleri ve bir miktar koyu renkli tanenin varlığı tespit edilmiştir.

-0,250 mm tane boyutundaki malzeme kuru manyetik ayırmaya uygun olmadığı için sadece maksimum manyetik alanda nasıl bir davranış göstereceğini tespit edebilmek için bir deney gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu küçüldükçe topaklanma dediğimiz salkımlaşma olmakta ve taneler besleme hızı minimum tutulduğu halde hem birbiri üstüne tabakalanmakta hem de taşıyıcı banda yapışmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen yapılan deneyden de yine yaklaşık 0,01 gr mertebelerinde de olsa bir manyetik ürün elde edilmiştir.

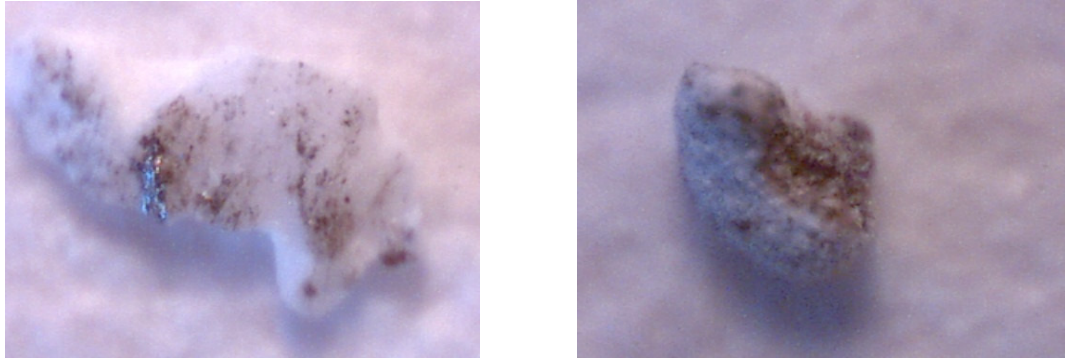
Tablo 4.2: Üleksit mineralinin (normal)manyetik ayırma deney sonuçları

TANE BOYUTU	MANYETİK ALAN Tesla	Many. Ürün Miktar(gr)		N-Many. Ürün Miktar(gr)	Deney Süresi dakika
		Y. M	D.M		
-2+1 mm (2 mm disk yük.)	0,50 (1 Amp.)	-	-	200,30	20
	0,96 (2 Amp.)	-	-	200,40	20
	1,22 (3 Amp.)	-	-	200,20	20
	1,42 (4 Amp.)	-	-	200,40	20
-1+0,5 mm (1,5 mm disk yük.)	0,58 (1 Amp.)	-	-	200,50	30
	1,04 (2 Amp.)	-	~0,01	199,80	30
	1,32 (3 Amp.)	-	~0,01	199,80	30
	1,50 (4 Amp.)	-	~0,01	200,10	30
-0,5+0,250 mm (1 mm disk yük.)	0,70 (1 Amp.)	-	~0,01	199,40	45
	1,10 (2 Amp.)	-	~0,01	199,00	45
	1,46 (3 Amp.)	-	~0,01	199,60	45
	1,64 (4 Amp.)	-	~0,01	199,70	45
-0,250 mm (1 mm disk yük.)	1,64 (4 Amp.)	-	~0,01	199,90	45

-2+1 mm tane boyutunda üleksit numuneleri üzerinde yapılan manyetik ayırma deneylerinde kolemanit mineralinde olduğu gibi hiçbir manyetik ürün alınamamıştır. Yapılan mikroskopik incelemede de bu boyut grubunda manyetik özellik gösterebilecek safsızlıkların olmadığı, temiz üleksit kristallerinden oluştuğu gözlenmiştir.

-1+0,5 mm tane boyutunda yapılan deneylerde 0,58 Tesla'da manyetik ürün alınamamasına karşın diğer manyetik alan büyüklüklerinde çok düşük miktarlarda da olsa manyetik tanelerin disk tarafından toplanarak non-manyetik üründen ayrıldığı görülmüştür. Manyetik ürüne gelen tanelerin yapılan mikroskopik incelemesinde; tanelerin büyük oranda koyu renkli ve az da olsa üleksit bünyesine girmiş kahverengimsi demir oksit bileşenleri içerdiği tespit edilmiştir.

-0,5+0,250 mm tane boyutunda, farklı manyetik alanlarda yapılan deneylerde de az da olsa bir miktar manyetik tanelerin disk tarafından çekilerek non-manyetik üründen ayrıldığı görülmüştür. Yapılan mikroskopik incelemelerde de yine aynı şekilde demiroksit ile boyanmış üleksit taneleri ve bir miktar koyu renkli tanenin varlığı tespit edilmiştir. Tanelerin çekilen 200X büyütme optik mikroskoptaki görüntüleri Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20: Üleksit mineraline ait manyetik ürünün optik mikroskoptaki görüntüleri

-0,250 mm tane boyutundaki üleksit numunesi üzerinde de sadece maksimum manyetik alanda bir deney yapılarak tanelerin manyetik alan altındaki davranışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Tane boyutunun neden olduğu olumsuzluklara rağmen yapılan deneyden de yine yaklaşık 0,01 gr mertebelerinde de olsa bir manyetik ürün elde edilmiştir.

Mikrodalga enerjiye maruz kalmamış numuneler üzerinde yapılan manyetik ayırma deneylerinden sonra mikrodalga enerjiye maruz bırakılmış kolemanit ve üleksit minerallerinin manyetik ayırma deneylerine geçilmiştir. Uygulanan mikrodalga güç seviyesi ve maruz kalma süresinin seçiminde daha önce farklı güç seviyelerinde ve farklı süreler ile mikrodalga enerjiye maruz kalan numunelerin yapılan XRD analizlerinden yararlanılmıştır.

Kolemanit mineralinin farklı süre ve güç seviyelerinde mikrodalgaya maruz bırakıldıktan sonra üzerinde yapılan XRD analizleri neticesinde; uygulanan 5 farklı güç seviyesinde de mikrodalga enerjinin kolemanitin kristal yapısında fark edilir bir değişim meydana getirmediği görülmüştür. Dolayısı manyetik ayırma deneylerinden önce numuneler 360 W güç seviyesi ve 30 dk maruz kalma süresinde mikrodalga enerji ile muamele edilmişlerdir.

Mikrodalga enerjiye maruz kalmış üleksit minerali üzerinde yapılan XRD analizleri neticesinde; 180 W ve 360 W mikrodalga güç seviyelerinde 30 dakika mikrodalga radyasyona maruz kalan üleksit mineralinin kristal yapısında göze çarpan herhangi bir değişim gözlenmezken, 540 W ve üzerindeki mikrodalga güç seviyelerinde kristal yapının tamamen bozulduğu tespit edilmiştir. Üleksit mineralinin yapısını bozmayacak en yüksek mikrodalga güç seviyesi olan 360 W ve 30 dk maruz kalma süresi manyetik ayırma deneyleri öncesi numune hazırlamak için uygun güç seviyesi olarak belirlenmiştir.

Belirlenen güç seviyesi ve maruz kalma süresinde mikrodalga fırın içerisinde mikrodalga enerjiye maruz kalan kolemanit numuneleri süre sonunda mikrodalga fırından çıkar çıkmaz tartılarak ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Daha sonra hemen manyetik ayırma deneyine geçilmiştir. Manyetik ayırma deney şartları kıyaslama yapabilmek için bir önceki deney grubundakiler ile aynı tutulmuştur. Mikrodalgaya bağlı yapılan manyetik ayırma deneylerinden elde edilen sonuçlar kolemanit ve üleksit için sırasıyla Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’de verilmiştir.

Numuneler üzerinde mikrodalga işlem sonrası yapılan manyetik ayırma deneylerinde mikrodalga enerjiye maruz kalmamış olanlardan farklı bir sonuç elde edilememiştir. Örneğin; -2+1 mm tane boyutundaki malzemenin manyetik ayırma sonuçlarına baktığımızda burada da herhangi bir manyetik ürün elde edilememiştir. Mikroskop altında yapılan incelemede çok az miktarda bağlı tanelerin olmasına rağmen oldukça temiz kristallerden oluştuğu görülmüştür. Bağlı tanelerin manyetik alandan etkilenmemesi; disk yüksekliğine bağlı manyetik alanın maksimum seviyeye

ulaşamaması ve bağlı tanedeki manyetik özellik gösteren matriksin yüzdesinin düşük olması nedeniyle açıklanabilir.

-1+0,5 mm tane boyutunda yapılan mikrodalgaya bağlı manyetik ayırma deneylerine baktığımızda ise; normal manyetik ayırma deneylerinden çok farklı bir sonuç elde edilmediği burada da görülmektedir. Farklı olarak 0,58 Tesla ve 1,32 Tesla'da manyetik ayırıcıdaki diskin ön tarafından da çok az miktarda manyetik özellik gösteren taneler alınmıştır.

Tablo 4.3: Kolemanit mineralinin mikrodalgaya bağlı manyetik ayırma deney sonuçları

TANE BOYUTU	MANYETİK ALAN Tesla	Ağırlık Kaybı %	Many. Ürün Miktar(gr)		N-Many. Ürün Miktar(gr)	Deney Süresi dakika
			Y. M	D.M		
-2+1 mm (2 mm disk yük.)	0,50 (1 Amp.)	0,20	-	-	199,50	20
	0,96 (2 Amp.)	0,20	-	-	199,90	20
	1,22 (3 Amp.)	0,20	-	-	199,50	20
	1,42 (4 Amp.)	0,21	-	-	198,60	20
-1+0,5 mm (1,5 mm disk yük.)	0,58 (1 Amp.)	0,30	~0,01	~0,01	199,50	30
	1,04 (2 Amp.)	0,35	-	~0,01	199,00	30
	1,32 (3 Amp.)	0,90	~0,01	~0,01	199,40	30
	1,50 (4 Amp.)	0,49	-	~0,01	199,40	30
-0,5+0,250 mm (1 mm disk yük.)	0,70 (1 Amp.)	0,25	~0,001	~0,02	199,40	45
	1,10 (2 Amp.)	0,30	~0,001	~0,02	199,50	45
	1,46 (3 Amp.)	0,29	~0,001	~0,02	199,50	45
	1,64 (4 Amp.)	0,35	~0,001	~0,02	199,10	45
-0,250 mm (1 mm disk yük.)	1,64 (4 Amp.)	0,30	-	0,01	199,00	45

-0,5+0,250 mm tane boyutunda da yapılan deneylerde miktar ve nitelik olarak normal manyetik ayırma deneylerinden farklı bir sonuç görülmemiştir. Yapılan mikroskop incelemelerinde de manyetik özellik gösteren tanelerin genelde koyu renkli ve az da olsa bağlı taneler şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

-0,250 mm tane boyutundaki malzemeye de mikrodalgayı takiben maksimum manyetik alanda tek bir deney yapılmıştır. Deney sonunda elde edilen manyetik ürünün miktar ve niteliği bakımından diğerinden farklı olmadığı görülmüştür. Bu tane boyutu grubunun kuru manyetik ayırmaya uygun olmadığı da deneyler sırasında anlaşılmıştır.

-2+1 mm tane boyutunda üleksit numuneleri üzerinde mikrodalgaya bağlı yapılan manyetik ayırma deneylerinde mikrodalgaya maruz kalmamış olan numunelerde olduğu gibi hiçbir manyetik ürün alınamamıştır. Diğer boyut gruplarına yapılan mikrodalgaya bağlı manyetik ayırma deneylerinde de normal deneylerde elde edilen sonuçlar alınmıştır.

Tablo 4.4: Üleksit mineralinin mikrodalgaya bağlı manyetik ayırma deney sonuçları

TANE BOYUTU	MANYETİK ALAN Tesla	Ağırlık Kaybı %	Many. Ürün Miktar(gr)		N-Many. Ürün Miktar(gr)	Deney Süresi dakika
			Y. M	D.M		
-2+1 mm (2 mm disk yük.)	0,50 (1 Amp.)	2,30	-	-	195,50	20
	0,96 (2 Amp.)	2,75	-	-	194,50	20
	1,22 (3 Amp.)	2,50	-	-	197,30	20
	1,42 (4 Amp.)	2,40	-	-	195,30	20
-1+0,5 mm (1,5 mm disk yük.)	0,58 (1 Amp.)	2,50	-	~0,001	195,10	30
	1,04 (2 Amp.)	3,25	-	~0,001	193,50	30
	1,32 (3 Amp.)	2,50	-	~0,001	194,50	30
	1,50 (4 Amp.)	3,80	-	~0,001	191,80	30
-0,5+0,250 mm (1 mm disk yük.)	0,70 (1 Amp.)	2,99	~0,001	~0,002	194,00	45
	1,10 (2 Amp.)	3,29	~0,001	~0,002	193,40	45
	1,46 (3 Amp.)	3,05	~0,001	~0,002	193,90	45
	1,64 (4 Amp.)	2,79	~0,001	~0,002	194,50	45
-0,250 mm (1 mm disk yük.)	1,64 (4 Amp.)	3,19	~0,01	~0,01	193,80	45

Genel olarak yapılan tüm kuru manyetik ayırma deneyleri sonucunda; tane üzerine belli süreler ile uygulanan mikrodalga enerjinin tatbik edilen manyetik ayırma parametreleri dahilinde numunenin manyetik özelliklerine olumlu veya olumsuz herhangi bir etki yapmadığı tespit edilmiştir.

Yine deneyler sırasında çok az miktarda da olsa manyetik ürün olarak alınan ürünün numune hazırlama sırasında yeterince uzaklaştırılamayan safsızlıklar ve kırma esnasında kırıcıdan kopan metalik pullardan ibaret olduğu tespit edilmiştir. 200X büyütmeli optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.21’de verilmiştir. Deneylerde alınan manyetik ürünün yapılan mikroskobik incelemesinde de bu doğrulanmıştır.



Şekil 4.21: Deneyler sırasında manyetik ürüne gelen metalik pulların görüntüsü

4.4 ELEKTROSTATİK AYIRMA DENEYLERİ

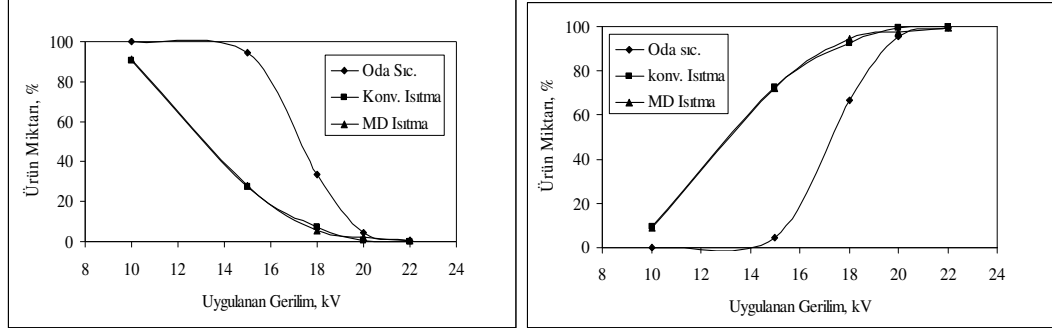
Mikrodalgaya bağlı deneylere başlamadan evvel, kolemanit ve üleksit numunelerinin normal oda sıcaklığındaki ($\sim 22^{\circ}\text{C}$) ve konvansiyonel ısıtma altındaki ($\sim 65^{\circ}\text{C}$) davranışları araştırılmıştır. Bu iki grup deneyden elde edilen veriler daha sonra mikrodalgaya bağlı elektrostatik ayırma deneylerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılarak mikrodalga enerjinin her iki numune üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

-1+0,5 mm tane boyutundaki kolemanitin oda sıcaklığındaki (ısıtmasız), konvansiyonel ön ısıtmaya bağlı ve mikrodalga ön ısıtmaya bağlı elektrostatik ayırma deneylerinde 60 d/dk tambur dönüş hızı, 1000 gr/dk besleme miktarı ve ayırıcı bıçak konumları sabit tutularak uygulanan 10 kV, 15 kV, 18 kV, 20 kV ve 22 kV'luk yüksek gerilimin ayırma üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kolemanit numunesine ait deneylerden elde edilen tüm sonuçlar Tablo 4.5'de verilmiştir

Tablo 4.5: Kolemanitin elektrostatik ayırma deney sonuçları

ODA SICAKLIĞI	Gerilim	10 kV	15 kV	18 kV	20 kV	22 kV
		% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar
	Bölme 1	100	95,58	33,54	4,35	0,41
KONV. ISITMA	Bölme 2	0	4,42	66,46	95,65	99,59
	Gerilim	10 kV	15 kV	18 kV	20 kV	22 kV
		% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar
MD ISITMA	Bölme 1	90,67	27,21	7,54	0,40	0,10
	Bölme 2	9,33	72,79	92,46	99,60	99,90
	Gerilim	10 kV	15 kV	18 kV	20 kV	22 kV
		% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar
	Bölme 1	90,88	27,95	5,37	2,40	0,41
	Bölme 2	9,12	72,05	94,63	97,60	99,59

Kolemanite ait deneylerden elde edilen veriler değerlendirilerek Şekil 4.22'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.22: Kolemanit numunesi için uygulanan elektriksel gerilime bağlı olarak Bölme 1 ve 2'ye gelen ürün değişimi

Kolemanit minerali üzerinde oda sıcaklığında yapılan birinci aşama deneylerde 18 kV'a kadar herhangi bir değişim görülmezken 18 kV üzerindeki yüksek gerilimlerde kolemanit yüzeyinin elektrik iyonları ile yüklendiği ve bu elektronları tambura iletemediği için tambura yapışarak hareket ettiği ve 20 kV'da %95,65'inin, 22 kV'da ise %99,59'unun tambura yapışarak Bölme 2'de toplandığı görülmektedir. Yapılan literatür incelemelerinde kolemanit mineralinin yalıtkan bir özellik gösterdiği tespit edilmiştir, bu bakımdan literatürle uyumlu bir sonuç elde edilmiştir [151].

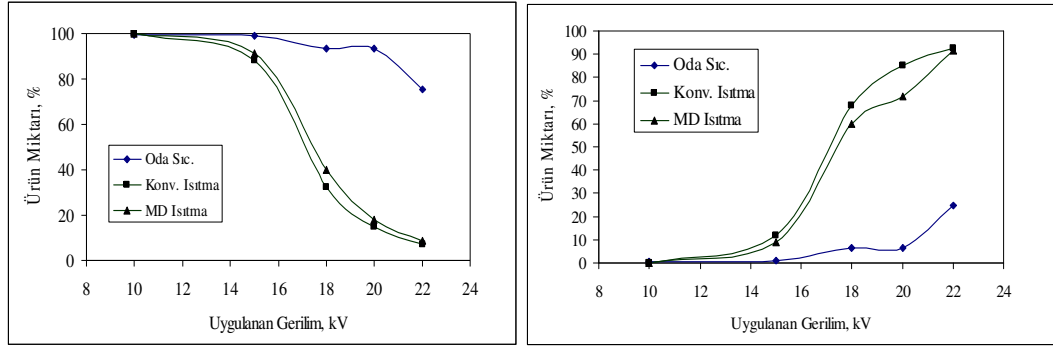
Yapılan ikinci aşama deneylerde kolemanit örnekleri konvansiyonel bir fırında 65 °C'de bir saat süreyle ısıya maruz bırakılmış, fırından çıkarılan örneklerin ısını kaybetmemesi için elektrostatik ayırıcının da ısıtma ünitesi açılarak farklı gerilimlerde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarını incelediğimizde en düşük gerilimde bile ısı etkisinin kendisini gösterdiğini, kolemanit tanelerinin elektron tutarak tambura yapışmaya başladığını görmekteyiz. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde 10 kV gerilimde hiçbir tane tambura yapışmazken ısı uygulaması ile yaklaşık %9,33 malzeme tambura yapışarak hareket etmiş, gerilim arttıkça bu oran da artarak 20 kV'da %99,6 ve 22 kV'da ise %99,9'a çıkmıştır.

Yapılan üçüncü aşama deneylerde ise; kolemanit numunesi öncelikle 360 W mikrodalga güç seviyesinde 30 dk süre ile mikrodalga enerjiye maruz bırakılmış, süre sonunda mikrodalga fırından çıkarılan örnekler hemen önceden ısıtılmış titreşimli besleme oluşuna dökülerek ısısını kaybetmeden farklı gerilimlerde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde; uygulanan en düşük gerilim olan 10 kV'da bir önceki yapılan konvansiyonel ısıtmaya benzer sonuçlar alındığını görmekteyiz. Konvansiyonel ısıtmada bu miktar %9,33 iken mikrodalga ısıtma sonrasında tambura yapışan tane miktarı %9,12 olmuştur. 10 kV'un üstündeki gerilimlerde de konvansiyonel ısıtma ile aynı değerler elde edilmiştir. Buradan kolemanitin normal koşullarda yalıtkan olduğu, ısı etkisi ile yalıtkan özelliğinde giderek artan bir yükselişin olduğu görülmektedir. Ancak konvansiyonel ve mikrodalgaya bağlı ısıtma arasında belirgin bir fark tespit edilememiştir. Üleksit mineralinin oda sıcaklığındaki, konvansiyonel ön ısıtmaya bağlı ve mikrodalga ön ısıtmaya bağlı elektrostatik ayırma deney sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir

Tablo 4.6: Üleksitin elektrostatik ayırma deney sonuçları

ODA SICAKLIĞI	Gerilim	10 kV	15 kV	18 kV	20 kV	22 kV
		% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar
	Bölme 1	99,70	99,10	93,39	93,49	75,25
	Bölme 2	0,30	0,90	6,61	6,51	24,75
KONV. ISITMA	Gerilim	10 kV	15 kV	18 kV	20 kV	22 kV
		% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar
	Bölme 1	99,70	99,10	32,20	14,69	7,23
	Bölme 2	0,30	0,90	67,80	85,31	92,77
MD ISITMA	Gerilim	10 kV	15 kV	18 kV	20 kV	22 kV
		% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar	% Miktar
	Bölme 1	99,79	91,23	40,04	28,18	8,56
	Bölme 2	0,21	8,77	59,96	71,82	91,44

Üleksit mineraline ait deneylerden elde edilen veriler değerlendirilerek Şekil 4.23'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.23: Üleksit numunesi için uygulanan elektriksel gerilime bağlı olarak Bölme 1 ve 2'ye gelen ürün değişimi

Üleksit mineralleri üzerinde yapılan birinci aşama deneylerde; oda sıcaklığında 10 kV'dan başlayarak 15-18-20 ve 22 kV gerilimlerinde besleme, tambur dönüş hızı ve ayırıcı bıçak konumları sabit tutularak bir dizi deney yapılmıştır.

10 kV'da yapılan deneyde tanelerin hemen hemen tamamı parabolik bir hareket izlemiş ve iletken ürün kabına toplanmıştır. Tanelere uygulanan gerilim arttıkça tambura yapışarak hareket eden malzeme miktarı da artmıştır. 10 kV'dan başlayarak sırasıyla bu miktarlar %0,3, %0,9, %6,61, %6,51 ve %24,75 şeklinde gerçekleşmiştir. Yalıtkan taneler 18 kV'a kadar uygulanan gerilimlere önemli bir tepki vermemiştir. 18 kV'un üstündeki gerilimlerde iyon bombardımanı ile yükleme gerçekleştiği için oda sıcaklığında iletken olan üleksit taneleri parabolik bir hareket izleyerek Bölme 1'e toplanırken bir miktar numunenin tambura yapışarak yalıtkan ürün toplama kabı olan Bölme 2'ye geldiği gözlenmiştir.

İkinci aşama deneylerde ısı etkisinin üleksitin iletkenliği üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Üleksit minerali yaklaşık olarak 60-65 °C'da kristal suyunu kaybetmeye başlamakta 105 °C'da ilk mol suyunu vermektedir. Bu nedenle 65 °C'de konvansiyonel bir fırında ön ısıtma yapılmış numuneler deney sırasında ısılarını kaybetmemeleri için elektrostatik ayırıcının da ısıtıcısının açılması sonrasında farklı gerilimlerde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

10 kV gerilimde yapılan ilk deneyde numune hiçbir etkilenme göstermezken, gerilim arttırıldıkça üleksitin yalıtkan özelliği de artmış, örneğin 18 kV'da %67'si, 20 kV'da %85,31'i ve 22 kV'da %92,77'si yalıtkan ürün toplama kabına gelmiştir. Bir önceki oda sıcaklığında 22 kV'da ısı uygulaması olmaksızın yapılan deneyde numunenin sadece %24,75 inin yalıtkan ürün toplama kabına geldiğini göz önüne alınırsa sıcaklığın üleksitin iletkenliğine olan etkisini görebiliriz.

Üçüncü aşama deneylerde mikrodalga ön ısıtma uygulanmış üleksit numuneleri kullanılmıştır. 100'er gram olarak hazırlanmış üleksit numuneleri 360 W mikrodalga güç seviyesinde ve 30 dk maruz kalma süresinde mikrodalga enerjiye tabi tutulmuş ve süre sonunda derhal elektrostatik ayırıcı cihazının önceden ısıtılmış titreşimli besleme oluşuna yerleştirilmiştir. Mikrodalga fırından çıkan numunenin sıcaklığı infrared termometre ile yaklaşık 110 °C olarak ölçülmüştür. Fırında %6 ya yakın bir ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Elektrostatik ayırıcıdaki deney süresi 6 dk, besleme miktarı ise yaklaşık 16 gr/dk olarak ölçülmüştür.

Mikrodalgaya bağlı deney sonuçlarını incelediğimizde; 10 kV'da tanelerin herhangi bir etkilenme göstermediğini, fakat 15 kV'dan itibaren artan gerilimle doğru orantılı olarak malzemenin yalıtkan özelliğinin arttığını görmekteyiz. Nitekim bu oran 15 kV'da %8,77, 18 kV'da %59,96, 20 kV'da %71,82 ve 22 kV'da ise %91,44 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar konvansiyonel ısıtma sonrasında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre biraz düşük olmakla beraber çok yakın olarak gerçekleşmiştir.

Bu sonuçlardan; üleksitin oda sıcaklığında iletken özellik gösterdiği, sıcaklık uygulaması ve artan gerilimde ise yalıtkan bir malzeme gibi davrandığı anlaşılmaktadır. Üleksitin yapılan TG-DTA analizleri ne göre 65 °C'de suyunu kaybetmeye başladığı ve 105-110 °C'de ilk mol suyunu kaybettiğini düşünürsek, numunenin kristal suyunu kaybetmesi ile bazı iletken iyonların daha az aktif hale geldikleri söylenebilir. Üleksit mineralinin iletken özellik göstermesinin en önemli nedenleri arasında içerdiği toprak alkali metallerden stronsiyum'dan kaynaklandığı belirtilmektedir. Ayrıca literatürde bor mineralleri ile beraber bulunan killer ve bu killerin içerdiği empüritelerin özellikle Sr ve Li oranları numunelerin elektrostatik ayırıcıdaki davranışlarını etkilediği rapor edilmiştir[151].

4.5 FLOTASYON DENEYLERİ

Mikrodalga enerjisinin malzeme yüzeyleri üzerindeki etkileri kuru yöntemler olan manyetik ve elektrostatik ayırma deneyleri ile incelendikten sonra yine malzeme yüzeyi ile doğrudan ilişkili yaş bir yöntem olan flotasyon denenerek kuru ve yaş zenginleştirme yöntemleri arasındaki fark incelenmeye çalışılmıştır.

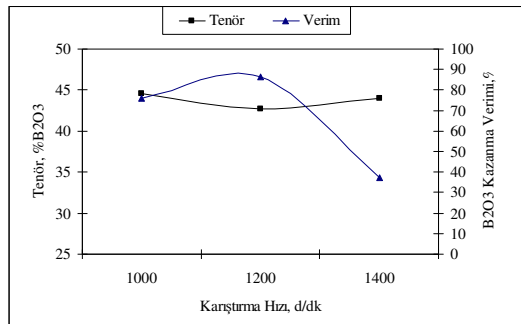
4.5.1 Normal Flotasyon Deneyleri

Flotasyon deneylerinde kullanılan kolemanit cevher numunesi ilk aşamada; mikrodalga ön işlem görmemiş, sadece şlamı atılmış numuneler üzerinde hava şiddeti, karıştırma hızı ve pülpte katı oranının etkisini belirleyebilmek için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

İlk aşama deneylerde hava miktarı 1000 cm^3 ve pülpte katı oranı %11'de (2 lt'lik Denver Sub 2A tipi flotasyon selülü) sabit tutulmuş, karıştırma hızının flotasyona etkisi araştırılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak da Şekil 4.24 oluşturulmuştur.

Tablo 4.7: 1000 cm^3 hava miktarında şlamsız yapılan flotasyon deney sonuçları(2lt)

K.Hızı	1000 d/dk			1200 d/dk			1400 d/dk		
Ürünler	Miktar %	% B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ %Verim	Miktar %	% B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ %Verim	Miktar %	% B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ %Verim
Yüzen	55,37	44,61	76,15	67,22	42,69	86,20	27,44	44,02	37,03
Batan	44,63	17,33	23,85	32,78	14,02	13,80	72,56	28,31	62,97
Besleme	100,00	32,43	100,00	100,00	33,29	100,00	100,00	32,62	100,00



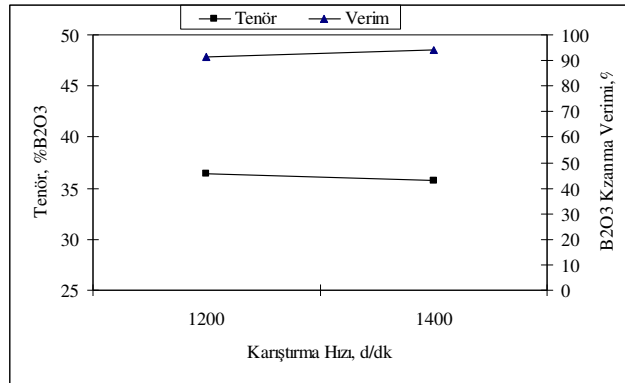
Şekil 4.24: Sabit PKO ve 1000 cm^3 hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi

Elde edilen bu sonuçları incelediğimizde karıştırma hızı 1000 d/dk'dan 1200 d/dk'ya çıkarıldığında konsantre tenörü çok az düşmesine rağmen verimin arttığı fakat karıştırma hızı 1400 d/dk'ya çıkarıldığında ise birden kolemanitin büyük bir kısmının bastırıldığını görüyoruz. Karıştırma hızının artması ile köpükler patlamaya başlamış ve kolemanit tanecikleri tekrar dibe doğru hareket etmiştir. Verimin %37'de kalması bunu göstermektedir.

Hava miktarı 1200 cm^3 olarak artırılıp ve pülpte katı oranı yine %11'de (2 lt'lik flotasyon selülü) sabit tutulan ve şlamsız olarak yapılan ikinci aşama deneylerde karıştırma hızının flotasyona etkisi araştırılmıştır. 1000 d/dk karıştırma hızında cihazın çektiği hava miktarı 1200 cm^3 'ün altında kaldığı için bu karıştırma hızında deney yapılmamıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.8'de verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak da Şekil 4.25 oluşturulmuştur.

Tablo 4.8: 1200 cm^3 hava miktarında şlamsız yapılan flotasyon deney sonuçları(2lt)

K.Hızı	1200 d/dk			1400 d/dk		
	Miktar	%	B_2O_3	Miktar	%	B_2O_3
Ürünler	%	B_2O_3	%Verim	%	B_2O_3	%Verim
Yüzen	79,99	36,44	91,29	86,32	35,80	94,19
Batan	20,01	13,90	8,71	13,68	13,92	5,81
Besleme	100,00	31,93	100,00	100,00	32,81	100,00



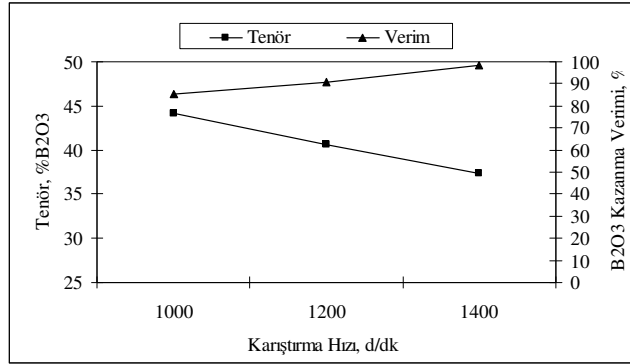
Şekil 4.25: Sabit PKO ve 1200 cm^3 hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi

Deney sonuçlarını incelediğimizde karıştırma hızı 1200 d/dk'dan 1400 d/dk'ya çıkarıldığında bir önceki deneylerin aksine konsantre tenöründe yaklaşık %1'lik düşmeye karşın B_2O_3 % kazanma veriminde %3'lük bir artış meydana gelmiştir. Buradan hava miktarı artışının flotasyona olumlu etki yaptığı söylenebilir.

Üçüncü aşama deneylerde pülpte katı oranı %6'ya düşürülmüş (4 lt'lik flotasyon selülü kullanılmış), sabit hava miktarında (1000 cm^3), ve numunenin şlamı atılarak karıştırma hızının flotasyona etkisi araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.9'da verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak da Şekil 4.26 oluşturulmuştur.

Tablo 4.9: 1000 cm^3 hava miktarında şlamsız yapılan flotasyon deney sonuçları(4lt)

K.Hızı	1000 d/dk			1200 d/dk			1400 d/dk		
Ürünler	Miktar %	% B_2O_3	B_2O_3 %Verim	Miktar %	% B_2O_3	B_2O_3 %Verim	Miktar %	% B_2O_3	B_2O_3 %Verim
Yüzen	63,28	44,15	85,50	73,02	40,67	91,02	86,25	37,41	98,63
Batan	36,72	12,90	14,50	26,98	10,86	8,98	13,75	3,26	1,37
Besleme	100,00	32,67	100,00	100,00	32,63	100,00	100,00	32,72	100,00



Şekil 4.26:Sabit pülpte katı oranı ve 1000 cm^3 hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi (Şlamsız)

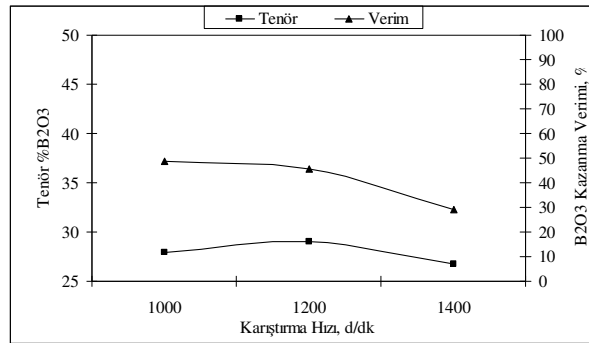
Elde edilen verileri incelediğimizde %6 pülpte katı oranında ve karıştırma hızını arttırdığımızda B_2O_3 % kazanma veriminin doğru orantılı olarak arttığı fakat konsantre B_2O_3 % tenörünün de o nispette düştüğü görülmektedir. Örneğin 1400 d/dk'da B_2O_3 % kazanma verimi %98,63'e çıkarken konsantre B_2O_3 % tenörü %37,41'e düşmüştür.

Şlamsız yapılan deneylerden sonra aynı şartlarda şlamı atılmadan hazırlanan numuneler üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde şlamanın flotasyona etkisi araştırılmıştır.

Hava miktarı 1000 cm^3 ve pülp te katı oranı %11'de (2 lt'lik flotasyon selülü) sabit tutulan ilk deneylerde karıştırma hızının flotasyona olan etkisi araştırılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.10'da verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak da Şekil 4.27 oluşturulmuştur.

Tablo 4.10: 1000 cm^3 hava miktarında şlamlı yapılan flotasyon deney sonuçları(2lt)

K.Hızı	1000 d/dk			1200 d/dk			1400 d/dk		
	Miktar	%	B_2O_3	Miktar	%	B_2O_3	Miktar	%	B_2O_3
Ürünler	%	B_2O_3	%Verim	%	B_2O_3	%Verim	%	B_2O_3	%Verim
Yüzen	43,00	27,96	48,83	41,36	29,03	45,47	28,79	26,79	29,25
Batan	57,00	22,10	51,17	58,64	24,55	54,53	71,21	26,20	70,75
Besleme	100,00	24,62	100,00	100,00	26,40	100,00	100,00	26,37	100,00



Şekil 4.27: Sabit pülp te katı oranı ve 1000 cm^3 hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi (Şlamlı)

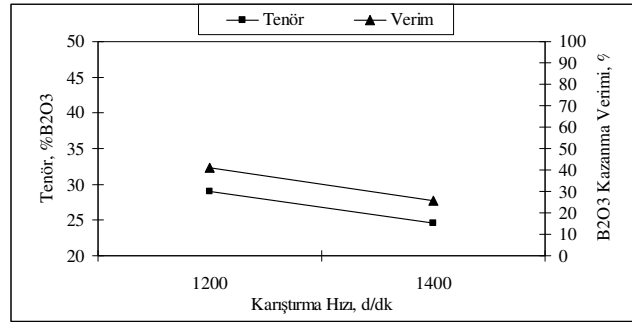
Elde edilen verileri incelediğimizde; hava miktarını 1000 cm^3 'de sabit tutarak karıştırma hızını arttırdığımızda hem tenör hem de B_2O_3 kazanma veriminin azaldığını görmekteyiz. Bu sonuçlardan 1000 cm^3 hava miktarında yeterli miktarda köpük oluşturamadığı ve şlamanın flotasyona olumsuz etkelediği görülmektedir.

Hava miktarını 1200 cm^3 'de sabit tutup yine 2 lt'lik (%11 pülp te katı oranı) selülde, 1200 ve 1400 d/dk karıştırma hızlarında şlamlı olarak iki deney yapılmıştır. 1000 d/dk

kariştırma hızında cihaz 1200 cm³ hava çekemediği için bu deney yapılamamıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.11’de verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak da şekil 4.28 oluşturulmuştur.

Tablo 4.11: 1200 cm³ hava miktarında şlamlı yapılan flotasyon deney sonuçları(2lt)

K.Hızı	1200 d/dk			1400 d/dk		
	Miktar	%	B ₂ O ₃	Miktar	%	B ₂ O ₃
Ürünler	%	B ₂ O ₃	%Verim	%	B ₂ O ₃	%Verim
Yüzen	37,09	29,00	41,01	27,87	24,51	25,62
Batan	62,91	24,59	58,99	72,13	27,50	74,38
Besleme	100,00	26,23	100,00	100,00	26,67	100,00



şekil 4.28:Sabit pülpte katı oranı ve 1200 cm³ hava miktarında kariştırma hızının flotasyona etkisi (şlamlı)

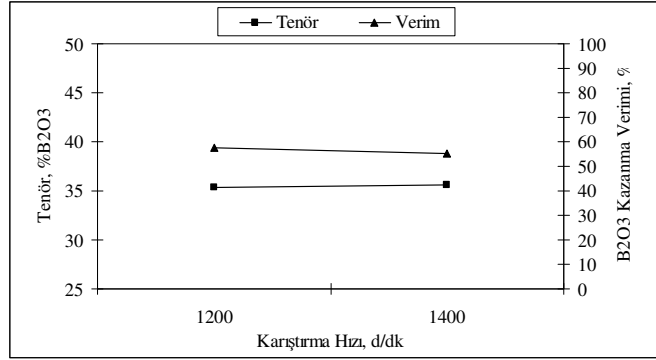
Verileri incelediğimizde hem verim hem de tenörün bariz bir şekilde düştüğu görölmektedir. şlamlın ve artan kariştırma hızının olumsuz etkisi burada da görölmektedir.

şlamlı yapılan deneylerde pülpte katı oranının değişiminin flotasyona olan etkisini araştırmak için de bir dizi deney yapılmıştır. Pülpte katı oranı %6 (4 lt’lik flotasyon selölü) olarak ayarlanıp, hava miktarı önce 1000 cm³ sonra 1200 cm³ de sabit tutularak bu pülpte katı oranında kariştırma hızının flotasyona etkisi araştırılmıştır.

1000 cm³ hava miktarında yapılan deney sonuçları Tablo 4.12’de verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak da şekil 4.29 oluşturulmuştur.

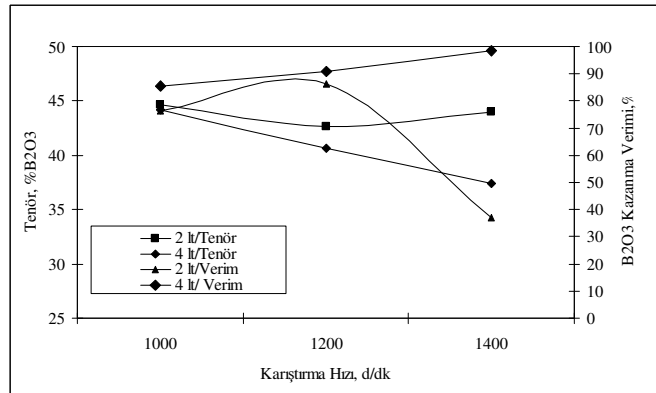
Tablo 4.12: 1000 cm³ hava miktarında şıamlı yapılan flotasyon deney sonuçları(4lt)

K.Hızı	1200 d/dk			1400 d/dk		
Ürünler	Miktar %	% B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ %Verim	Miktar %	% B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ %Verim
Yüzen	43,20	35,37	57,75	42,82	35,65	55,13
Batan	56,80	19,68	42,25	57,18	21,73	44,87
Besleme	100,00	26,46	100,00	100,00	27,69	100,00

Şekil 4.29: Sabit pülpte katı oranı ve 1000 cm³ hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi (%6 pülpte katı oranı)

%6 pülpte katı oranı ve 1000 cm³ hava miktarında karıştırma hızı 1200 d/dk'dan 1400 d/dk'ya çıkartıldığında tenördeki çok düşük artışa karşın verimde %2'lik bir azalma olduğu görülmektedir.

Sadece pülpte katı oranının etkisini görebilmek için 1000 cm³ sabit hava miktarında şıamsız olarak 1000, 1200 ve 1400 d/dk karıştırma hızında yapılan deneylerden elde edilen veriler ile Şekil 4.30 oluşturulmuştur.

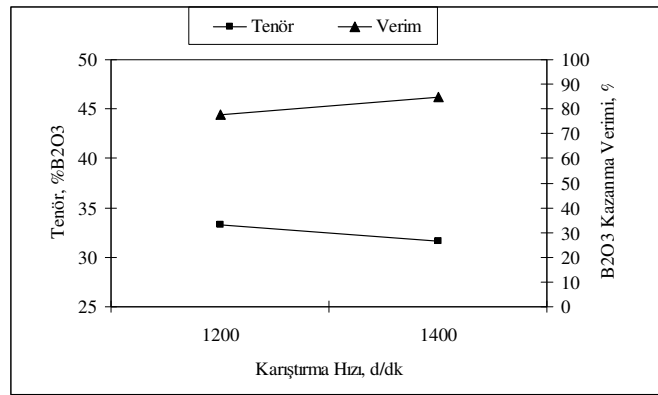
Şekil 4.30: Pülpte katı oranının flotasyona etkisinin incelenmesi(1000cm³, de)

Örneğin 1000 d/dk'da %11 pülpte katı oranında yapılan deneyden elde edilen konsantrenin B_2O_3 % tenörü %44,61 iken B_2O_3 % kazanma verimi %76,15 olmuştur. %6 pülpte katı oranında ise konsantrenin B_2O_3 % tenörü %44,15 iken B_2O_3 % kazanma verimi %85,5'e çıkmıştır. Dikkati çeken bir diğer nokta ise %11 pülpte katı oranında (2 lt'lik selül) karıştırma hızı 1000 d/dk dan 1200 d/dk'ya çıkarıldığında B_2O_3 % kazanma verimi %76,15'den %86,2'ye çıkarken karıştırma hızı 1400 d/dk olarak artırıldığında birden bire %37,03'lere düşmüştür. Bu kullanılan selül hacminin flotasyonu etkilediğini göstermektedir, zira 1400 d/dk karıştırma hızında 4 litrelik selülde yapılan deneylerde konsantrenin B_2O_3 % tenörü %37,41 olurken B_2O_3 % kazanma verimi %98,63'lere yükselmiştir.

Yine %6 pülpte katı oranında (4 lt'lik selül) bu kez hava miktarını 1200 cm^3 'de sabitleyip karıştırma hızının etkisini belirlemek için deneyler yapılmış, elde edilen sonuçlar Tablo 4.13'de verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak da Şekil 4.31 oluşturulmuştur.

Tablo 4.13: 1200 cm^3 hava miktarında şamlı yapılan flotasyon deney sonuçları(4lt)

K.Hızı	1200 d/dk			1400 d/dk		
Ürünler	Miktar %	% B_2O_3	% Verim	Miktar %	% B_2O_3	% Verim
Yüzen	62,15	33,28	77,94	69,58	31,61	84,73
Batan	37,85	15,47	22,06	30,42	13,03	15,27
Besleme	100,00	26,54	100,00	100,00	25,96	100,00



Şekil 4.31: Sabit pülpte katı oranı ve 1200 cm^3 hava miktarında karıştırma hızının flotasyona etkisi

%6 pülpte katı oranında hava miktarının 1000 cm^3 'den 1200 cm^3 'ye çıkması ile B_2O_3 % kazanma verimi %57'lerden 1200 d/dk karıştırma hızında %78'lere 1400 d/dk karıştırma hızında ise %85'lere çıkmıştır. Bu arada tenörde çok küçük bir düşme meydana gelmiştir.

4.5.2 Mikrodalga Ön İşlemlili Flotasyon Deneyleri

Orijinal numune, konvansiyonel ön ısıtmaya tabi tutulmuş (65°C 'da 60dakika) numune ve 2 farklı güç seviyesinde (30 dk maruz kalma süresinde 540 W ve 900 W mikrodalga güç seviyelerinde) mikrodalga fırında işlem görmüş numunelerinin flotasyon davranışlarını görmek için bir dizi deney planlanmıştır. Flotasyon öncesinde konvansiyonel ısıtmanın uygulanmasının sebebi sadece sıcaklığın flotasyon sonuçları üzerinde bir etkisinin olup olmadığının anlaşılması içindir.

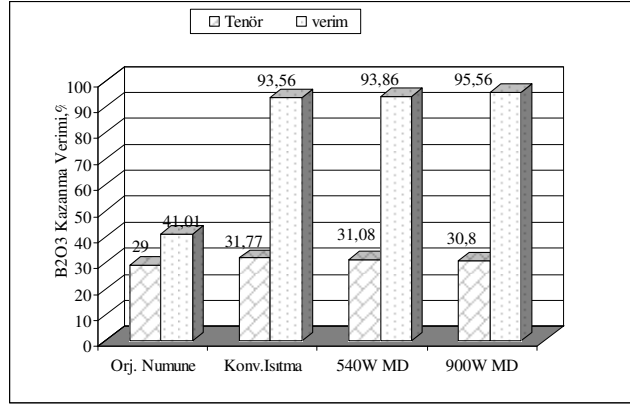
Bu deneylerde normal flotasyon deneylerinde uyguladığımız %11 pülpte katı oranı (2 litrelik flotasyon selülü), 1200 d/dk karıştırma şiddeti ve 1200 cm^3 hava miktarı kullanılmıştır. Deneyler doğal pH'da ve numune şlamı atılmadan gerçekleştirilmiştir. Her bir farklı numune için koşullar sabit tutularak deneyler yapılmış, elde edilen sonuçlar Tablo 4.14 ve Tablo 4.15'de verilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak da Şekil 4.32 oluşturulmuştur.

Tablo 4.14:Orijinal ve konvansiyonel ısıtmaya bağlı flotasyon deney sonuçları

	Orijinal Numune			Konv. Isıtma		
	Miktar	%	B_2O_3	Miktar	%	B_2O_3
Ürünler	%	B_2O_3	%Verim	%	B_2O_3	%Verim
Yüzen	37,09	29,00	41,01	84,06	31,77	93,56
Batan	62,91	24,59	58,99	15,94	11,53	6,44
Besleme	100,00	26,23	100,00	100,00	28,54	100,00

Tablo 4.15: İki farklı mikrodalga güçte muamele edilmiş numunenin flotasyon sonuçları

	540 W Güç Seviyesi			900 W Güç Seviyesi		
	Miktar	%	B_2O_3	Miktar	%	B_2O_3
Ürünler	%	B_2O_3	%Verim	%	B_2O_3	%Verim
Yüzen	84,83	31,08	93,86	87,02	30,80	95,56
Batan	15,17	11,37	6,14	12,98	9,59	4,44
Besleme	100,00	28,09	100,00	100,00	28,05	100,00



Şekil 4.32: Değişik numunelerin flotasyon davranışları (1200 cm³ hava miktarı, 1200 d/dk karıştırma hızı, %11 pülp te katı oranı)

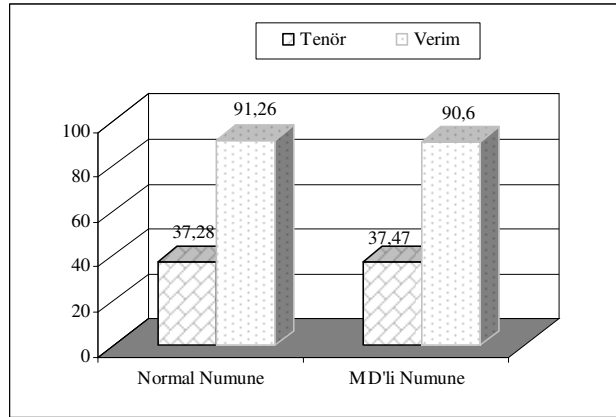
Tablo ve grafik verilerini incelediğimizde en yüksek B₂O₃ % kazanma veriminin 900 W'da mikrodalga enerjiye maruz kalmış numunede elde edildiğini buna karşılık en yüksek B₂O₃ tenöründe orijinal yani işlem görmemiş numune üzerinde yapılan flotasyon deneyinden alındığı görülmektedir.

Flotasyon deneylerinin sonuçları göstermiştir ki konvansiyonel veya mikrodalga enerjisi ne bağlı olarak elde edilen sıcaklıklar flotasyon verimi ve konsantre tenörü üzerinde benzer etkiler oluşturmaktadır. Buna göre normal flotasyona oranla hem konvansiyonel hem de mikrodalga ısıtma yoluyla elde edilen olumlu flotasyon sonuçları, flotasyon esnasında etken parametrenin sadece sıcaklık olduğunu göstermiştir.

Şlamı atılmış normal numune ile şlamı atıldıktan sonra mikrodalga enerjiye maruz kalmış numunenin 1200 cm³ hava miktarında, 1200 d/dk karıştırma hızı ve %6 pülp te katı oranı (4 lt'lik selül) şartlarında yapılan flotasyon deney sonuçları Tablo 4.16'da verilmiştir. Elde edilen veriler ışığında Şekil 4.33 oluşturulmuştur.

Tablo 4.16: Orijinal ve mikrodalgada işlem görmüş numunenin flotasyon sonuçları

	Orijinal Numune			MD'ye Maruz K. Num.		
	Miktar	%	B ₂ O ₃	Miktar	%	B ₂ O ₃
Ürünler	%	B ₂ O ₃	% Verim	%	B ₂ O ₃	% Verim
Yüzen	75,89	37,28	91,26	74,65	37,47	90,60
Batan	24,11	11,23	8,74	25,35	11,45	9,40
Besleme	100,00	31,00	100,00	100,00	30,87	100,00



Şekil 4.33:1200 d/dk'da normal ve MD'li numunenin şlamsız flotasyon sonuçları

Mikrodalga enerjiye maruz kalmış şlamı önceden atılmış numunenin flotasyon deneyinde normal koşullarda yapılan flotasyon deneyinden verim ve tenör açısından bariz bir fark oluşmadığı görülmüştür.

5 TARTIŞMA VE SONUÇ

Kolemanit ve üleksit minerallerinin mikrodalga enerjiye maruz kalmaları sonrasında yapılarında meydana gelen değişimler ve bu değişimlerin kolemanit ve üleksitin çözünürlüğü, öğütülebilirliği, manyetik ve elektrostatik ayırmaya verdiği tepki ve son olarak da kolemanitin flotasyon ile zenginleştirilmesine olan etkilerini belirlemek amacıyla yapılan bir dizi deneyler sonrasında elde edilen sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür;

- Deneylerde, 2450 MHz frekansında çalışan, ev tipi bir mikrodalga fırın kullanılmıştır. Sistematiik deneylerde parametre olarak 5 farklı güç seviyesinin denenebilmesi için mikrodalga fırının 900 W olan sabit gücü mikrodalga fırın üzerinde bulunan bir ayar düğmesinin 5 farklı konuma getirilmesi ile uygulama süresine bağı olarak sinüzoidal bir hareket yapan mekanizma yardımı ile 180-360-540-720-900 W seviyelerine ayarlanabilmiş ve bu değerler bir wattmetre ile kontrol edilmiştir.

- Kolemanit ve üleksit mineralleri üzerinde mikrodalga güç seviyesine ve maruz kalma süresine bağı olarak numunelerin ulaştıkları sıcaklıklar infrared termometre ile ölçülmüştür. Bu ölçümlerde infrared termometre ile ancak numunelerin yüzey sıcaklıkları tespit edilebilmiştir. Numunenin yüzeyinde ölçülen sıcaklıkların numunenin merkezindeki sıcaklıktan bir miktar daha düşük olduğu bilinmektedir. Genel olarak özetlediğimizde güç seviyesi arttıkça numuneler daha kısa sürede ısınmaktadırlar. Örneğin kolemanit numunesinin ölçülen sıcaklığı 360W güç seviyesinde ve 60 dk maruz kalma süresinde yaklaşık 175 °C olurken, aynı sıcaklığa 540W'da 12 dakikada, 720W'da 10 dakikada ve 900W'da yaklaşık 8 dakikada ulaşılmaktadır. Üleksit numunesine baktığımızda ise örneğin 180W güç seviyesinde 75 °C'ye 40 dakikada ulaşılırken, aynı sıcaklığa 360W'da 12 dakikada, 540W'da 8 dakikada, 720W'da 5 dakikada ve 900W'da yaklaşık 4 dakikada ulaşılmaktadır.

- Kolemanit minerali sırası ile yukarıda belirtilen 5 farklı güç seviyesinde ve farklı sürelerde mikrodalga enerjiye maruz kaldığında yapısında bulunan su molekülleri mikrodalga enerjinin etkisi ile titreşmekte ve bunun etkisi ile de ısı ortaya çıkmaktadır. Her bir güç seviyesinde 5dk, 10dk, 15dk, 30dk ve 45dk sürelerle mikrodalga enerjiye maruz kalmış kolemanit numunelerinin XRD, FT-IR ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılan tetkiklerinde önemli bir yapısal değişikliğe rastlanmamış, ağırlık kayıplarından yola çıkılarak kolemanitin kristal yapısında bulunan tamamı 5 mol olan suyun ancak 0,6 mol'ünü kaybettiği tespit edilmiştir. Yapılan literatür incelemesinde de kolemanitin ilk mol suyunu 330 °C seviyelerinde kaybetmiş ve hızlı bir şekilde çok kısa bir sıcaklık aralığında yani 412 °C'de tüm kristal suyunu kaybederek dekrepite olduğu belirtilmektedir.

- Doğal haliyle 8 mol kristal suya sahip olan üleksit minerali ilk molekül suyunu 60 °C'da vermeye başlayıp 105°C'da ilk mol suyunu kaybetmektedir. Üleksit minerali kristal yapısında 8 mol su içermekte ve kolemanitin aksine geniş bir ısı yelpazesinde kristal suyunu yavaş yavaş kaybetmektedir. Örneğin 178°C'da 4 mol suyu uzaklaştırırken, 267°C'da 7 mol ve 450 °C'da 8 mol suyun tamamı uzaklaşmaktadır. Üleksit minerali 5 farklı güç seviyesinde ve farklı sürelerde mikrodalga enerjiye maruz kaldığında güç düzeyi ve maruz kalma süresindeki artışa bağlı olarak kristal yapısındaki suyu kademeli olarak kaybetmeye başlamaktadır; örneğin maksimum güç seviyesi olan 900W'da ve 45 dakika maruz kalma süresinde yaklaşık 7 mol suyunu kaybettiği tespit edilmiştir. Mikrodalga fırın içerisinde çok yüksek sıcaklık sıçramaları meydana gelerek kullanılan kap ve fırın zarar gördüğünden daha yüksek sıcaklıklara çıkılamamıştır. Ancak bulgular literatür değerleri ile uyumludur.

- Sıcaklık, pülpte katı oranı ve çözünme süresi gibi farklı parametrelerin çözünürlüğe olan etkilerinin araştırıldığı deneylerde karıştırma hızı sabit tutulmuş, ortam olarak da distile su kullanılmıştır. Deneylerde; oda sıcaklığı(22 °C) , 45 °C ve 60 °C su sıcaklık değerlerinde, %5, %10, %15, %20 ve %25 pülpte katı oranında, 30 dk, 45 dk, 60 dk, 75 dk ve 90 dk çözünme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra beş farklı güç seviyesinde ve farklı sürelerde mikrodalga enerjiye maruz bırakılan numunelerin çözünürlük deneyleri de yapılarak bir önceki elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Mikrodalga enerjiye maruz bırakılan numunelerin, sıcaklığa bağlı

olarak meydana gelen yapısal değişimleri nedeniyle kolemanit ve üleksit minerallerinin çözünürlüklerinde sıcaklığa maruz kalmamış olan numunelere göre sırası ile %58 ve %60'a varan oranda bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

- Literatürde belirtildiği üzere her bir mineralin sahip olduğu farklı dielektrik özellikler nedeniyle numuneler mikrodalga enerjiye maruz kaldıklarında kısa sürelerde yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadırlar. Öğütme üzerine yapılan deneylerden elde edilen sonuçları incelediğimizde; ani sıcaklık artışı tane yapısında tane ara yüzeyleri boyunca farklı termal gerilimler üretmekte ve mikro çatlaklar oluşturmaktadır. Oluşan mikro çatlaklar da numunenin öğütülmesine yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada; -8mm+4mm, -4mm+2mm ve -2mm+1mm olarak üç farklı tane boyut grubunda mikrodalga enerjiye maruz kalmadan ve belli bir süre (5dk, 10dk, 15dk ve 30dk) maruz bırakıldıktan sonra yürütülen öğütme deneylerinden elde edilen sonuçlar mukayese edilerek, mikrodalga enerjinin numunelerin öğütülebilirliğine olan etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Öğütme deneyleri kuru ortamda 2,5 lt hacminde seramik bilye gövdeli değirmen içerisinde gerçekleştirilmiştir. Öğütme süresi her bir deney için 15 dk olarak sabit tutulmuştur. Öğütülen her bir numune kuru olarak elek analizine (4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,3mm, 0,212mm ve 0,150 mm) tabi tutulmuştur.

-8mm+4mm tane boyutundaki kolemanit için yapılan öğütme deneylerinden elde edilen verileri incelediğimizde; normal şartlarda -0,150 mm tane boyutuna geçen malzeme miktarı %50,4 iken, 180W mikrodalga güç seviyesinde %66,6'ya, 360W'da %67,97'ye, 540W'da %66,93'e, 720W'da %68,40'a ve 900W'da %69,16'ya çıkmıştır. Aynı tane boyut grubundaki üleksit minerali için; normal şartlarda %49,43 olan -0,150 mm tane boyutundaki malzeme miktarı 180W'da %60,64'e, 360W'da %70,36'ya, 540W'da %86,60'a, 720W'da %90,74'e ve 900W'da %94,34'e çıkmıştır. Bu sonuçlara göre öğütülebilirlikteki değişim üleksitte çok daha net görülebilmektedir.

-4mm+2mm tane boyutundaki kolemanit için yapılan öğütme deneylerinden elde edilen verileri incelediğimizde; normal şartlarda -0,150 mm tane boyutuna geçen malzeme miktarı %89,19 iken, 180W mikrodalga güç seviyesinde %89,10'ya, 360W'da %90,57'ye, 540W'da %91,09'a, 720W'da %90,32'ye ve 900W'da %90,86'ya çıkmıştır.

Aynı tane boyut grubundaki üleksit minerali için; normal şartlarda %73,39 olan -0,150 mm tane boyutundaki malzeme miktarı 180W'da %77,84'e, 360W'da %83,45'e, 540W'da %90,69'a, 720W'da %93,06'ya ve 900W'da %98,31'e çıkmıştır. -4mm+2mm tane boyutunda da öğütülebilirlikteki değişim üleksitte daha net olarak görülebilmektedir.

-2mm+1mm tane boyutundaki kolemanit için yapılan öğütme deneylerinden elde edilen verileri incelediğimizde; normal şartlarda -0,150 mm tane boyutuna geçen malzeme miktarı %94,15 iken, 180W mikrodalga güç seviyesinde %94,40'a, 360W'da %93,62'ye, 540W'da %93,97'ye, 720W'da %94,25'e ve 900W'da %94,21'e çıkmıştır. Tane boyut grubu incelendiği için öğütmeler arasındaki fark oldukça küçülmüştür bu yüzden mikrodalga enerjinin etkisi bu boyut grubunda diğerlerindeki kadar net görülememektedir. Aynı tane boyut grubundaki üleksit minerali için; normal şartlarda %80,21 olan -0,150 mm tane boyutundaki malzeme miktarı 180W'da %84,60'a, 360W'da %87,25'e, 540W'da %91,02'ye, 720W'da %94,82'ye ve 900W'da %97,18'e çıkmıştır. -4mm+2mm tane boyutunda da öğütülebilirlikteki değişim kolemanitten farklı olarak üleksitte daha nettir.

Mikrodalga enerjisine bağlı öğütmedeki kolaylığın kolemanit ve üleksit minerallerinin belli sıcaklıklardaki kristal sularını kaybetmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Manyetik ayırma deneylerinde; -2mm+1mm, -1mm+0,5mm ve -0,5mm+0,250mm tane boyut gruplarındaki kolemanit ve üleksit minerallerinin normal ve mikrodalga enerjiye maruz kaldıktan sonra farklı manyetik alan şiddetlerinde bir dizi deneyler yapılmış ve elde edilen veriler birbiri ile mukayese edilerek mikrodalga enerjinin kolemanit ve üleksitin manyetik duyarlılığına olan etkisi incelenmiştir. Deneylerde yüksek alan şiddetli diskli kuru elektromanyetik ayırıcı kullanılmış ve her tane boyut grubuna en düşük 0,5 Tesla ile en yüksek 1,64 Tesla olan dört farklı manyetik alan uygulanmıştır.

-2mm+1mm tane boyutunda hem normal hem de mikrodalga enerjiye maruz kalmış numune de manyetik ürün alınamamıştır. Yapılan mikroskobik incelemede de bu boyut grubunda manyetik özellik gösterebilecek safsızlıkların olmadığı görülmüştür. Tane

boyutu incelidikçe disk yüksekliği yeniden ayarlanmış ve buna paralel olarak oluşan manyetik alan büyüklüğü artırılmıştır. -1mm+0,5mm tane boyutunda manyetik alandan etkilenen bazı manyetik duyarlılığı olan safsızlıklar tutulmuştur. Yapılan mikroskobik incelemede tanelerin büyük oranda koyu renkli ve az da olsa kolemanit bünyesine girmiş kahverengimsi demir oksit bileşenleri şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen manyetik ürün miktarı beslemeye göre yaklaşık onbinde beş gibi çok küçük bir miktarda olmuştur. Hem kolemanit hem de üleksit mineralleri normal şartlarda non-manyetik özellik göstermektedir. Mikrodalga enerjiye maruz kaldıktan sonra yapılan deneylerden de benzer sonuçlar alınmış ve buradan uygulanan mikrodalga enerjinin kolemanit ve üleksitin manyetik duyarlılıkları üzerinde herhangi bir etki yapmadığı sonucuna varılmıştır.

Manyetik ayırma deneyleri saf numuneler üzerinde gerçekleştirildiğinden deney sonuçlarının irdelenmesinde kantitatif (bor içeriğine bağlı) değerlendirmeler yerine kalitatif (sadece manyetik ve manyetik olmayan malzeme miktarı) değerlendirmeler göz önüne alınmıştır.

- Elektrostatik ayırma ile ilgili yapılan literatür incelemesinde; kolemanit minerali oda sıcaklığında yalıtkan özellik gösterirken, üleksit mineralinin yapısında bulunan stronsiyum ve lityum gibi toprak alkaliler nedeniyle iletken özellik gösterdiği öne sürülmektedir. Yine ısıl gerilimler altında kolemanit yalıtkan özelliğini korurken üleksit minerali yalıtkan davranış sergilemektedir.

Bu çalışmada uygulanan elektrostatik ayırma deneylerinde; -1mm+0,5 mm tane boyutundaki kolemanit ve üleksit numunesi kullanılmış, besleme hızı, tambur dönüş hızı ve ayırıcı bıçakların konumu sabit tutularak 10kV ile 22kV arasında uygulanan 5 farklı gerilimin ayırmaya olan etkisi araştırılmıştır. Kolemanit mineralinin normal, konvansiyonel ısıtma ve mikrodalga enerjiye maruz kalma sonrası yapılan elektrostatik ayırma deneylerinden yalıtkan özellik gösterdiğini ve sıcaklık uygulaması ile de bu özelliğinde herhangi bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir. Uygulanan mikrodalga enerji de kolemanitin iletkenliği üzerinde bir değişim yaratmamıştır.

Elektrostatik ayırma deneyleri saf numuneler üzerinde gerçekleştirildiğinden deney sonuçlarının değerlendirilmesinde de bor içeriği dikkate alınmamış, sadece uygulanan enerjinin minerallerin iletken ve yalıtkanlığı üzerinde etki yaratıp yaratmadığı incelenmiştir. Elde edilen bulgular literatür ile uyumludur.

- Flotasyon deneyleri daha önce saf mineraller üzerinde yapılan diğer deneylerin aksine tüvenan kolemanit numunesi üzerinde yapılmıştır. Normal ve mikrodalga enerjiye maruz kalmış örnekler üzerinde, reaktif miktarı sabit tutularak, karıştırma hızı, hava miktarı ve katı sıvı oranı gibi fiziksel parametrelerin flotasyona etkileri incelenmiştir. Deneyler doğal pH'da gerçekleştirilmiş, numuneler şamlı ve şamsız olarak test edilerek şlamin flotasyona etkisi de araştırılmıştır.

Deneylerden elde edilen tüm sonuçları genel olarak değerlendirdiğimizde,

- a) Şlamin flotasyona olumsuz etkilediği, hem konsantre B_2O_3 %tenör hem de B_2O_3 % kazanma verimi açısından oldukça düşük değerlerin elde edildiği görülmüştür.
- b) Karıştırma hızı artışına bağlı olarak pülpte katı oranı ayırmada etkin olmuştur. Örneğin 2 lt'lik selülde yapılan deneyde 1400 d/dk karıştırma hızında ve 1000 cm^3 hava miktarında tenör %44,02 B_2O_3 olurken verim birden %37'lere düşmüştür. Bunu kolemanit ile yüklü hava kabarcıklarının büyük bir bölümünün bu küçük hacim ve yüksek karıştırma hızı etkisiyle patlaması olarak açıklanabilir. Aynı şartlarda selül hacmi 4 lt'ye çıkartıldığında tenör %35,37'ye düşerken verim %57,75'e çıkmıştır.
- c) Hava miktarı 1000 cm^3 'den 1200 cm^3 'ye çıkarıldığı takdirde, yine 2 lt'lik selülde yapılan deney sonucunda karıştırma hızı artışı ile bir miktar tenör düşmesine (%35,80 B_2O_3) rağmen verim artışı (%94,19) meydana gelmiştir.
- d) 1200d/dk karıştırma hızı, 1200 cm^3 hava miktarı, 2 lt'lik selül (%11 pülpte katı oranı) kullanılarak, orijinal numune, konvansiyonel ısıtılmış numune ve 2 farklı mikrodalga güç seviyesinde ısıtılmış numunelerin flotasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan flotasyon deneylerinden elde edilen verileri

incelediğimizde; orijinal numunede konsantre B_2O_3 tenörünün %29 ve B_2O_3 %kazanma veriminin %41,01 olduğu, konvansiyonel ön ısıtma deneyinde konsantre B_2O_3 tenörünün %31,77'ye düşmesine karşılık B_2O_3 % kazanma veriminin %93,56 ya çıktığı, 540 W mikrodalga güç seviyesinde konsantre B_2O_3 tenörünün %31,08, B_2O_3 % kazanma veriminin ise %93,86 olarak elde edildiği, son olarak da 900W'da yapılan deneyden konsantre B_2O_3 tenörü %30,80'e düşerken en yüksek B_2O_3 %kazanma verimi olan %95,56'nın elde edildiği tespit edilmiştir.

Konvansiyonel ısıtma ile mikrodalgaya bağlı ısıtma arasında flotasyon sonuçları açısından belirgin bir fark bulunamamıştır. Flotasyon öncesinde konvansiyonel ısıtma uygulamasında sadece sıcaklığın flotasyon sonuçları üzerinde bir etkisinin olup olmadığını görmek amaçlanmıştır.

- Bu doktora tez çalışmasının genel sonuçları incelendiğinde ülkemiz için son derece stratejik öneme sahip bor madenlerimizin değerlendirilebilirliği açısından, mikrodalga enerjisinin cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemlerine olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

- Hidrate bor minerallerinin karakterizasyon çalışmaları mikrodalga enerjisinin belli sıcaklık değerlerine ulaşıldığında mineral bünyesinde yapısal değişimlere yol açtığı ve bunun sonucu olarak da bor minerallerinin öğütülebilirliğinin ve yüzey kimyasına dayalı zenginleştirme yöntemleri uygulandığında elde edilen ürün kalitesinin olumlu yönde etkilendiği söylenebilir.

KAYNAKLAR

1. JONES DA, KINGMAN SW, LELYVELD TP, MAVROFİDİS, S.D. and MİLES NJ, 2002, Microwave heating applications in environmental engineering- A Review Resources, *Conservation and Recycling*, vol. 34 pp 75-90.
2. CHEN T. T., DUTRİZAC J.E., HAQUE K.E., WYSLOUZIL W. and KASHYAP S., 1984, The relative transparency of minerals to microwave radiation., *Canadian Metallurgical Quarterly* , vol 23, no 3, pp:349-351.
3. FANSLOW G., HOU C., BLUHM D. and MARKUSZEWSKI R., 1988, Microwave heating of coal and coal/caustic mixtures, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 23, No. 4, pp:211-217.
4. THOSTENSON E.T. and CHOU T.W., 1999 , Microwave processing: fundamentals and applications, *Composites: Part A* 30, p:1055-1071.
5. XIA D. K. and PICKLES C.A., 1997, Applications of microwave energy in extractive metallurgy, a review, *CIM Bulletin*, Volume 90, No 1011, pp:96-107, June.
6. YILDIZ K. ve ALP A., 2000., Metalurjik proseslerde mikrodalga kullanımı, *Metalurji Dergisi*, Cilt 24, Sayı:125, s.24-29.
7. HAQUE K. E., 1999, Microwave energy for mineral treatment processes- a brief review, *International Journal of Mineral Processing*, Vol 57, pp:1-24.
8. KANAT A., 2001, İ.T.Ü. KOSGEB’de geliştirilmekte olan mikrodalga fırında elma meyvesinin kurutulmasına yönelik bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
9. KLARK D.E., D FOLZ.C. and WEST J.K., 2000, Processing materials with microwave energy, *Materials Science and Engineering*, A287, p:153-158.
10. WANG Y., FORSSBERG G. and SVENSON M., 2000, Microwave assisted comminution and liberation of minerals, Mineral Processing on the Verge of the 21 st Century, 8. *International Mineral Processing Symposium* Istanbul/Turkey, Özbayoğlu et al., (eds), Balkema.
11. ERSAYIN S., ERGÜN Ş. L. and BENZER H., 1994, The effects of heat treatment on grinding and liberation of chromite ores, *Progress in Mineral Processing Technology*, 5. *International Mineral Processing Symposium* Cappadocia/Turkey, Demirel&Ersayin (eds), pp: 33-37, Balkema.

12. GILLON P., COURVILLE P., STEINCHEN A. and LALLEMANT M., 1987, Evaporation of polar liquids under low pressure and/or microwave irradiation, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 22, No. 3, pp:155-166.
13. NİTTA S., BİSSOMBOLO A., FURUYAMA T. and MORİ S., 2002, Relationship between bond's work index (W_i) and uniformity constant (n) of grinding kinetics on tower mill milling limestone, *International Journal of Mineral Processing*, 66, pp:79-87.
14. DİNCOV D.D., PARROTT K.A. and PERİCLEOUS K.A., 2004 , Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating, *Journal of Food Engineering*, Vol:65, Issue:3, December, p:403-412.
15. KUTBAY I. ve KUŞKONMAZ N., 2004 , Mikrodalga ısıtmanın seramik üretiminde kullanımı, *Metalurji Dergisi*, Sayı:137 s:52-56
16. ARTAN E. T., 1997Mikrodalga güç uygulama aparatlarında ısı dağılımının simülasyonu, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
17. USLU T. and ATALAY Ü., Microwave characteristics and microwave assisted magnetic enhancement of pyrite, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 225, Issues 1-3, 15 September 2003, Pages 161-167.
18. KİNGMAN S.W. and ROWSON NA, 1998, Microwave Treatment of Minerals- A Review, *Minerals Engineering*, vol. 11, No 11, pp 1081-1087.
19. KİNGMAN SW, VORSTER W. and ROWSON NA, 2000, The Influence of Mineralogy on Microwave Assisted Grinding, *Minerals Engineering*, Vol13, No.3, pp 313-327.
20. KİNGMAN SW, VORSTER, W. and ROWSON NA, 2001, The Effect of Microwave Radiation upon the Processing of Neves Corvo Copper Ore, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 63, 1, 29-44.
21. GREENWOOD RW KİNGMAN SW and ROWSON NA, 2002, A new method for determination of the optimum dispersant dosage in grinding, *Powder Technology*, vol.123, pp 199-207.
22. CLARK D. E., FOLZ D. C. and WEST J. K., 1997, Processing materials with microwave energy, *Department of Materials Science and Engineering*, University of Florida, Gainesville, FL 32611 -6400, USA.
23. SALSMAN J. B., WILLIAMSON R.L., TOLLEY W.K. and RİCE D.A., 1996, Short -pulse microwave treatment of disseminated sulfide ores, *Minerals Engineering*, volume 9, Issue 1, pp:43-54, January
24. CUTMORE N.G., LIU Y. and MIDDLETON A.G., 1997, Ore sorting, *Minerals Engineering*, Volume 10, No 4, pp:421-426.

25. KOCAKUŞAK S., KÖROĞLU J. H., EKİNCİ E. and TOLUN R., 1995, Production of Anhydrous borax using microwave heating, *Industrial&Engineering Chemistry Research*, No 34, pp:881-885.
26. KOCAKUŞAK S., KÖROĞLU H.J., GÖZMEN T., SAVAŞCI O.T. and TOLUN R., 1996, Drying of wet Borax pentahydrate by microwave heating, *Industrial&Engineering Chemistry Research*, No 35, pp:159-163.
27. ŞENER S. and ÖZBAYOĞLU G., 2001, Effect of heat treatment for the separation of ulexite from colemanite, *Colloquium Separation*, Berlin, GERMANY, p:138-143.
28. GÜNGÖR A. and ATALAY Ü., 1996, Microwave processing and grindability, *Innovations in Mineral and Coal Processing*, 7. International Mineral Processing Symposium Istanbul/Turkey, Atak, Önal& Çelik (eds), pp:13-16, Balkema, Rotterdam.
29. http://kuantum_x.sitemynet.com/page30.html[Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2006]
30. STUCHLY M. A. and STUCHLY S. S., 1983, Industrial, scientific, medical and domestic applications of microwaves, *IEE Proceedings*, Vol 130, No 8, pp:467-502.
31. JAUCHEM J.R., 1998, Health effects of microwave exposure: A review of the recent (1995-1998) literature, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 33, No.4, pp:263-274.
32. AL-HARAHSEH M. and KINGMAN W., 2003, Microwave-assisted leaching—a review, *Hydrometallurgy*, Volume 73, Issues 3-4, June 2004, Pages 189-203.
33. USLU T., 2002, Microwave heating characteristics of pyrite and microwave assisted coal desulphurisation, Thesis (Ph.D), University of METU.
34. BRADSHAW S., LOUW W., AL-HARAHSEH M., KINGMAN S. and HANKINS A. N., Somerfield C., 2005, The influence of microwaves on the leaching kinetics of chalcopyrite, *Minerals Engineering*, Volume 18, Issues 13-14, November 2005, Pages 1259-1268
35. IDRİS A., KHALİD K. and OMAR W., 2004, Drying of silica sludge using microwave heating, *Applied Thermal Engineering*, 24, p905–918.
36. DIETER B., 2003, Physical waves in adsorption technology-an overview, *Separation and Purification Technology*, 33, p163-177.
37. GÜNGÖR A. and ATALAY Ü., 1999, Grindability of Microwave- Heated Ores, *SME Annual Meeting*, March 1-3, Denver, Colorado.
38. ÖZBAYOĞLU G. and DEPCİ T., 2006, Improvement of coal grindability by microwave pretreatment, *XXIII International Mineral Processing Congress*, İstanbul/TURKEY

39. OBUT A., GİRGİN İ. and YÖRÜKOĞLU A., 2003, Microwave exfoliation of vermiculite and phlogopite, *Clays and clay minerals*, v.51 no:4, p:452-456.
40. RİSMAN P., 1991, Terminology and notation of microwave power and electromagnetic energy, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 26, No.4, pp:243-247.
41. KOÇ A., 2000, Mikrodalga enerjisinin cevher hazırlamadaki kullanımı, İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü , Seminer Çalışması, İstanbul.
42. CHOW TSE V. and READER H.C., 2000, Understanding microwave heating cavities, *ISBN 1-58053-094-X*, s:9-35.
43. BAYRAKTAR İ., 2002, Mikrodalga muamelesinin sülfürlü mineral yüzeylerine etkisinin incelenmesi, *Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu*, Proje No:YDABÇAG-397.
44. TÜRKOĞLU İ., 2002, Mikrodalga, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi, Elazığ.
45. OLMİ R., BİNİ M., IGNESTİ A. and RİMİNESİ C., 2000, Dielectric properties of wood from 2 to 3 GHz, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 35, No. 3, pp:135-143.
46. HARLFİNGER L., 1992, *Microwave sterilization*, Vol. 46, No. 12, pp:57-59, December.
47. SEYRANKAYA A. and OZALP B., 2006, Dehydration of sodium carbonate monohydrate with indirect microwave heating, *Thermochimica Acta*, 448, p31–36.
48. ÖZALP B., TARHAN S., SEYRANKAYA A. and KAYA E., 2006, Alternative drying of sodium sulfate decahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) with microwave energy, *XXIII International Mineral Processing Congress*, Istanbul-TURKEY, p:1682-1687.
49. KOCAKUŞAK S., İŞBİLİR F. ve DOĞAN H., 2003, Mikrodalga enerjisi ve sanayideki uygulamaları, seminer raporu, *TÜBİTAK- MAM Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü*.
50. BOHRER T. H., 1987, Packages incorporating microwave interactive heaters, *Journal Microwave Power E²*, pp:167.
51. BOWS J.R., 1999, Variable Frequency microwave heating of food, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 34, No.4, pp:227-238.
52. SUHM J. and HIGH L., 1999, Microwave technology for drying of sensitive products, *Asian Ceramics*, pp:36-39, November.
53. PICKLES C.A., 2004 , Microwave heating behaviour of nickeliferous limonitic laterite ores, *Minerals Engineering* 17, p775–784

54. OLOYEDE A. and GROOMBRIDGE P., 2000, The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood, *Journal of materials Processing Technology*, p:67-73
55. WHITTLES D.N., KINGMAN S.W. and REDDISH D.J., 2003, Application of numerical modelling for prediction of the influence of power density on microwave assisted breakage, *International Journal of Mineral Processing*, 68, pp:71-91.
56. JONES D.A., KINGMAN S.W., WHITTLES D.N. and LOWNDES I.S., 2005 , Understanding microwave assisted breakage, *Minerals Engineering* 18, p659–669.
57. JONES D.A., KINGMAN S.W., WHITTLES D.N. and LOWNDES I.S., 2005 , Understanding microwave assisted breakage, *Minerals Engineering* 18, p659–669.
58. JARO K.J., RAMAKRISHNAN P.A. and GADAGKAR R., 1999, Microwave preparation of oxide bronzes, *Journal of Solid State Chemistry*, Volume 148, Issue 1, pp:100-107.
59. MARLAND S., MERCHANT A. and ROWSON N., 2001, Dielectric properties of coal, *FUEL*, vol: 80, pp:1839-1849.
60. <http://www.gallava.com>. [Ziyaret Tarihi:3 Mart 2005].
61. ZETTERGREN L., 1998, Mobile microwave dryer, *U.S. Patent No: 5,797,194* August 25.
62. SUGISAWA K.M., YASUSHI T. and KAZIMUTSU H., 1987, Low pressure microwave drying apparatus, *U.S. Patent No: 4,637,145* January 20.
63. OSEPCHUK J. M., 1996, Healt and safety issues for microwave power transmission, *Fuel and Energy Abstracts*, vol:37, Issue 6, pp:462, November.
64. <http://www.emk.gazi.edu.tr/bildirge.htm> [Ziyaret Tarihi: 22 Nisan 2006].
65. BINNER J.G.P, CARO I. and FİRKİNS J., 1999, Microwave sintering of nanometer and micrometer ferrite powders, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 34, No. 3, pp:131-136.
66. PATİL D., MUTSUDDY B. and GARARD R., 1992, Microwave reaction sintering of oxide ceramics, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 27, No.1, pp:49-53.
67. DERLING ST. and ABİCHT H.P., 1996, Microwave sintering of BaTiO₃-based ceramics, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 31, No. 4, pp:221-227.
68. BRAM G., LOUPY A. and MAJDOUB M., 1990, Alkylolation of potassium acetate in “dry media” thermal activation in commercial microwave owens, *Tetrahedron*, vol:46, Issue:15, pp:5167-5176.

69. SUBRAMANIAN T., VENKATESH P., NAGARAJAN K. and VASUDEVA RAO P. R., 2000, A novel method of sintering UO_2 pellets by microwave heating, *Materials Letters*, 46, p120-124.
70. JUNJIE Z., MIAOGAO Z., JINZHONG X. and XUEHONG L., 2001, Preparation of CdS and ZnS nanoparticles using microwave irradiation, *Materials Letters*, 47, p25-29.
71. ARAVINDAN S. and KRISHNAMURTHY R., 1999, Joining of ceramic composites by microwave heating, *Materials Letters*, 38, p245-249.
72. ZHIPENG X., CHANGAN W., XUDONG F. and YONG H., 1999, Microwave processing and properties of Ce-Y-ZrO₂ ceramics with 2,45 GHz irradiation, *Materials Letters*, 38, p190-196.
73. ARAYA C. R., 2001, Method for microwave drying of ceramics, *U.S. Patent No:* 6,259,078 July 10.
74. PAREKH B. K., EPSTEIN H.E. and GOLDBERGER W.M., 1984, Novel comminution process uses electric and ultrasonic energy, *Mining Engineering*, pp:1305-1309, September.
75. JONES D.A., KINGMAN S.W., D WHITTLES.N. and I LOWNDES.S., 2006 , The influence of microwave energy delivery method on strength reduction in ore samples, *Chemical Engineering and Processing*, Volume 46, Issue 4, April 2007, Pages 291-299
76. WONNACOTT G. and WILLS B.A., 1990, Optimisation of thermally assisted liberation of a tin ore with the aid of computer simulation, *Minerals Engineering*, v.3, issues 1-2, p.187-198.
77. ŞENER S.. and ÖZBAYOĞLU G., 1996, Effect of heat treatment on grindability of ulexite, *Innovations in Mineral and Coal Processing*, 7. International Mineral Processing Symposium Istanbul/Turkey, Atak, Önal& Çelik (eds), pp:29-31, Balkema, Rotterdam.
78. LI Y., LIU J. and YANG W., 2006, Formation mechanism of microwave synthesized LTA zeolite, membranes, *Journal of Membrane Science*, Volume 281, Issues 1-2, 15 September 2006, Pages 646-657
79. KINGMAN S. W., JACKSON K., CUMBANE A., S BRADSHAW. M., ROWSON N. A. and GREENWOOD R., 2003, Recent developments in microwave-assisted comminution, *International Journal of Mineral Processing*, Int. J. Miner. Process., volume 74, Issue:1-4, p:71-83, 19 November.
80. SENER S., BILGEN S. and OZBAYOĞLU G., 2004, Effect of heat treatment on grindabilities of celestite and gypsum and separation of heated mixture by differential grinding, *Minerals Engineering*, Volume 17, p:473-475.

81. ORUMWENSE A.O. and NEGERİ T., 2003, The impact of microwave irradiation on the processing of a sulphide ore, *SME Annual Meeting* Feb. 24-26, Cincinnati, Ohio.
82. FITZGIBBON K.E. and VEASEY T.J., 1990, Thermally assisted liberation-a review, *Mineral Engineering*, Vol:3, N:1/2, , p:181-185.
83. WALDE S.G., BALASWAMY V., VELU V. and RAO D.G., 2002, Microwave drying and grinding characteristics of weat, *Journal of Food Engineering* 55, p:271-276.
84. WALKIEWICZ J.W., CLARK A.E. and MCGILL S.L., 1991, Microwave-Assisted Grinding, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol 27, No 2, pp: 239-243, Mart/April.
85. HARRISON P.C. and ROWSON N.A., The effect of microwave and conventional heat treatment on the comminution of coal, *Jubilee res. Event 1997* 1 33-36]
86. ZHONG S., 1997, Reduction of iron ore with coal by microwave heating, *Fuel and Energy Abstracts*, , pp:180, May.
87. AGUILAR J. A. and GOMEZ J., 1997, Microwaves applied to carbothermic reduction of iron ore pellets, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 32, No. 2, pp:67-73.
88. KOKAKUŞAK S., KÖROĞLU H.J., EKİNCİ E. and TOLUN R., 1994, Microwave processing of boric acid to produce granular boron oxide, *Progress in Mineral Processing Technology*, Demirel&Ersayın (eds), pp: 487-491, Balkema.
89. ADU B. and OTTEN L., 1996, Modeling microwave heating characteristics of granular hygroscopic solids, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 31, No. 1, pp:35-42.
90. STANDISH N., WÖRNER H. and KAUL H., 1998, Microwave drying of brown coal agglomerates, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 23, No. 3, pp:171-175.
91. LIGHTSEY G. and BHARAT G., 1987, Microwave vacuum drying in pretreatment step of acid hydrolysis, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 22, No. 3, pp:174-177.
92. DANIEL G. P., ISMAEL F. P., PEDRO F. V. and JUAN C. G., 1996, Determination of moisture content in power station coal using Microwave, *FUEL*, pp:133-138, June.
93. KOKAKUŞAK S., KÖROĞLU H.J. and TOLUN R., 1998, Drying of wet boric acid by microwave heating, *Chemical Engineering and processing*, vol:37, pp:197-201.

94. PERE C. and RODIER E., 2002, Microwave vacuum drying of porous media: experimental study and qualitative consideration of internal transfer, *Chemical Engineering and processing*, vol:41, issue 5, pp:427-436, May.
95. JONES P. L. And ROWLEY A.T., 1996, Dielectric drying, *Drying Technology*, vol:14, Issue: 5, pp:1063-1098, May.
96. PERE C. and RODIER E., 2002, Microwave vacuum drying of porous media: experimental study and qualitative consideration of internal transfers, *Chemical Engineering and Processing*, 41, 427-436.
97. ABDELGHANI-IDRISSI M. A., 2001, Experimental investigations of occupied volume effect on the microwave heating and drying kinetics of cement powder in a mono-mode cavity, *Applied Thermal Engineering*, vol:21, Issue: 9, pp:955-965, June.
98. GLOUANNEC P., LECHARPENTIER D. and NOEL H., 2002, Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material, *Applied Thermal Engineering*, vol:22, Issue: 15, pp:1689-1703, October.
99. KOKAKUŞAK S., KÖROĞLU J. and TOLUN R., 1998, Drying of wet boric acid by microwave heating, *Chemical Engineering and Processing*, 37, p:197-201.
100. RHODES G.W. 1981, Process for drying coal and other conductive materials using microwaves, *U.S. Patent No: 4,259,560* March 31.
101. HAUGH G., 1985, Microwave drying device and method, *U.S. Patent No: 4,549,053* October 22.
102. WENNERSTRUM S., 1989, Microwave vacuum dryer, *U.S. Patent No:4,856,203* August 15.
103. TOMIZAWA T., FUJITA T., UKAI K. and SUZUKI J., 1995, Drying apparatus, *U.S. Patent No: 5,477,623* December 26.
104. ABDELGHANI-IDRISSI M.A., 2001 , Experimental investigation of occupied volume effect on the microwave heating and drying kinetics of cement powder in a mono-mode cavity II, *Applied Thermal Engineering* 21, p p:975-985.
105. GÜNGÖR A. and ÖZBALTA N., 1997, Endüstriyel kurutma sistemleri, 3. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, Cilt 1, 20-23 Kasım, İzmir.
106. KOKAKUŞAK S., TOLUN R., EKİNCİ E., AKÇAY K., ÇOLAK O. ve KÖROĞLU J., 1993, Mikrodalga enerjisi ile susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) eldesi, IX *Symposium on chemistry and chemical engineering proceedings*, 20-24 September, , pp:529, KTU, Trabzon.

107. J VAN DER BERG., SWART P. and LACQUET B., 1992, Microwave properties of phosphate rock, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 27, No. 3, pp:183-189.
108. EYMİR. R. and OKUR H., 2005, Dehydration of ulexite by microwave heating, *Thermochimica Acta*, Volume 428, Issues 1-2 , April, p125-129.
109. LOVAS M., MUROVA I., MOCKOVČIAKOVA A., ROWSON N. and JAKABSKY S., 2003, Intensification of magnetic separation and leaching of Cu-ores by microwave radiation, *Separation and Purification Technology*, Volume 31, Issue 3, 1 June, Pages 291-299
110. GOMEZ R. A., 1995, Leaching process for nickel cobalt and manganese ores, *Minerals Engineering*, vol: 8, Issue:9, pp:1084, September.
111. HUA Y., LIN Z. and YAN Z., 2002, Application of microwave irradiation to quick leach of zinc silicate ore, *Minerals Engineering*, 15, p451-456.
112. YİANATOS J.B. and ANTONUCCI V., 2001, Molybdenite concentrate cleaning by copper sulfation activated by microwave, *Minerals Engineering*, Vol. 14, No:11, pp:1411-1419.
113. HUANG J. H. and ROWSON N. A., 2001, Heating characteristics and decomposition of pyrite and marcasite in a microwave field, *Minerals Engineering*, Volume 14, Issue 9, September, Pages 1113-1117.
114. VAN WYK E. J., BRADSHAW.M. and J DE SWARDT. B., 1998, The dependence of microwave regeneration of activated carbon on time and temperature, *International Microwave Power Institute*, vol. 33, no: 3, pp:151-157.
115. BRASHAW S. M., VAN WYK E.J. and de SWARDT J.B., 1997, reliminary economic assessment of microwave regeneration of activated cabon for the carbon in pulp process, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 32, No. 3, pp:131-144.
116. AVRAAMİDES J. and LA BROOY S.R., 1988, Evaluation of different reactivation systems available for carbons used for gold recovery, *Randol Gold Forum* 88, Scottsdale, Arizona, p:321-327.
117. BRADSHAW S., VAN WYK E. and DE SWARDT J., 1997, Qualitative measurement of heating uniformity in a multimode microwave cavity, *J. Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 32(2), p:87-95.
118. STRACK J.T., BALBAA I.S. and BARBER B.T., 1995, Microwave regeneration of activated carbon for gold processing applications, *Microwaves: Theory and Application in Materials Processing III*, eds. D.E. Clark, D.c. Folz, Ceramics Tranactions vol. 59, The American Ceramic Society, Westerville, Ohio, p:99-105.

119. BUTCHER D. A. and ROWSON N. A., 1996, Microwave pretreatment of coal prior to magnetic separation, *Fuel and Energy Abstracts*, vol:37, Issue 1, pp:5, January.
120. SINGH K. and MCWHINNIE W.R., 1996, Novel methods for the organic desulfurization of coal, *Fuel and Energy Abstracts*, vol:37, Issue 4, pp:254, July.
121. FERRANDO A. C., 1996, Coal desulphurization with hydroiodic acid and microwave, *Fuel and Energy Abstracts*, vol:37, Issue 5, pp:333, September.
122. ZHAO Q., 1997, Microwave desulfurization of coal, *Fuel and Energy Abstract*, vol:38, Issue 4, pp:215, July.
123. MONSEF-MIRZAI P., 1995, Rapid microwave pyrolysis of coal, *Fuel and Energy Abstracts*, vol:36, Issue 4, pp:281, July.
124. BUTCHER D. A. and ROWSON N. A., 1996, The desulfurization of coal using microwave energy, *Fuel and Energy Abstracts*, vol:37, Issue 2, pp:84, March.
125. LIU C.C., 1996, Measurement of electrical properties of a carbon black, *Fuel and Energy Abstracts*, vol:37, Issue 3, pp:232, May.
126. NORMAN L. M. and CHA C. Y., 1996, Production of activated carbon from coal chars using microwave energy, *Fuel and Energy Abstracts*, vol:37, Issue 1, pp:4, July.
127. ZHAO Q., 1997, Microwave desulfurization of coal, *Fuel and Energy Abstracts*, pp:215, July.
128. ELSAMAK G. G., ÖZTAŞ N.A. and YÜRÜM Y., 2003, Chemical desulfurization of Turkish Cayırhan lignite with HI using microwave and thermal energy, *FUEL*, vol: 82, pp:531-537.
129. ROWSON N. A. and RICE N.M., 1990, Magnetic enhancement of pyrite by caustic microwave treatment, *Minerals Engineering*, vol: 3, Issue:3-4, pp:355-361.
130. ROWSON N.A. and RICE N.M., 1990, Desulphurisation of coal using low power microwave energy, *Minerals Engineering*, vol: 3, Issue:3-4, pp:363-368.
131. BODMAN S., MONSEF P., MANAK H. and MCWHINNIE W.R., 1997, Does microwave heating have a role in functional group reaction of coal, *FUEL*, vol: 76, pp:1315-1318.
132. ŞİMŞEK E.H., KARADUMAN A. and OLCAY A., 2001., Investigation of dissolution mechanism of six Turkish coals in tetralin with microwave energy, *FUEL*, vol: 80, pp:2181-2188.
133. KOCAKUŞAK S., TOLUN R., EKİNCİ E., AKÇAY K., ÇOLAK O. and KÖROĞLU J., 1993, Mikrodalga enerjisi ile bor oksit (B_2O_3) üretimi, *IX*

Symposium on chemistry and chemical engineering proceedings, 20-24 September, , pp:526, KTU, Trabzon.

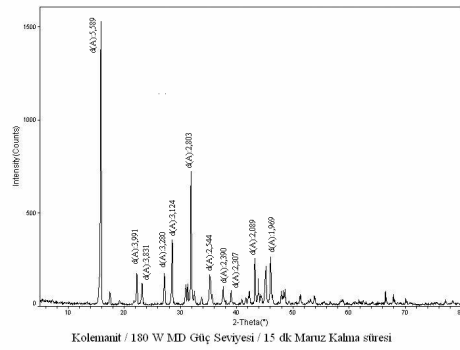
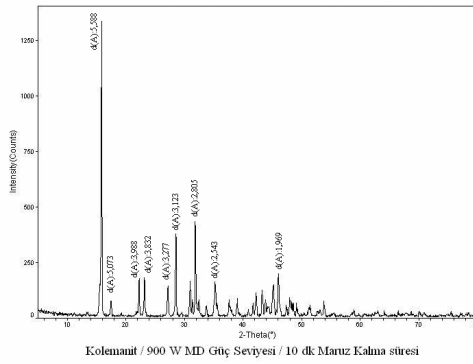
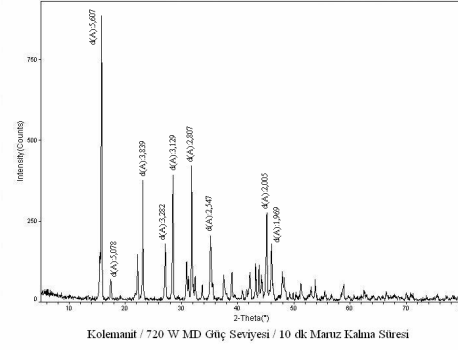
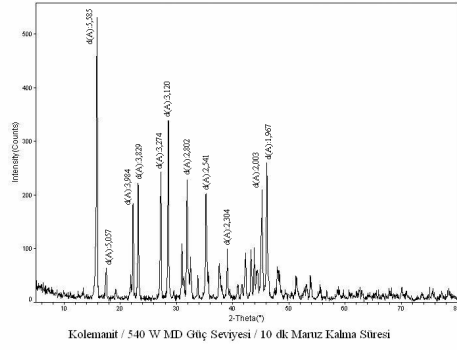
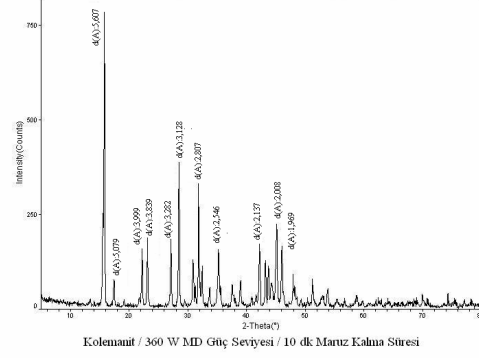
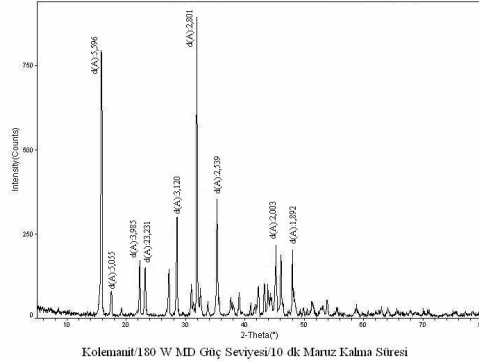
134. KOCAKUŞAK S., KÖROĞLU H.J., EKİNCİ E. and TOLUN R., 1997, Microwave calcination of hydrated borax compounds, *Tübitak Marmara Araştırma Merkezi*, Gebze, Kocaeli
135. PİŞKİN S., 1983 , Hidrate bor minerallerinin termik özellikleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
136. ÇELİK M. S. and SUNER F., 1995 , A thermodynamic analysis of the decrepitation process, *Thermochimica Acta* , 245, p:167-174.
137. <http://www.etimaden.gov.tr/> [Ziyaret Zamanı: 14.03.2004]
138. SÜMER G., 2004, Bor Bileşikleri, *II. Uluslar arası Bor Sempozyumu*, S:153-164, 23-25 Eylül ESKİŞEHİR.
139. TOKMAK B., 2004, Bor uç ürünleri ve BM bor teknolojileri tecrübesi, *II. Uluslar arası Bor Sempozyumu*, s:105-108, 23-25 Eylül ESKİŞEHİR
140. KILIÇ A.M., 2004, Bor madeninin Türkiye açısından önemi ve gelecekteki yeri, *II. Uluslar arası Bor Sempozyumu*, s:31-41, 23-25 Eylül ESKİŞEHİR
141. HELVACI C., 2006, Bor madencilğinde işletme, zenginleştirme ve pazarlama sorunları, *III. Uluslar arası Bor Sempozyumu*, s:559571
142. <http://www.zamandayolculuk.com/cetinbal/spektrum>. [Ziy.Tarihi:25.05.2007]
143. <http://www.linn-high-therm.de/microwave-continuous-belt-drier-mdbt> [Ziyaret Tarihi: 23.03.2004]
144. <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/sandik/gsm.pdf>
145. OZKAN S. G. and ACAR A., 2004, Investigation of impact of water type on borate ore flotation, *Water Research*, Volume 38, Issue 7, April, Pages 1773-1778
146. KOCA S. and SAVAS M., 2004, Contact angle measurements at the colemanite and realgar surfaces, *Applied Surface Science*, Volume 225, Issues 1-4, 30 March, Pages 347-355
147. KOCA S., SAVAS M. and KOCA H., 2003, Flotation of colemanite from realgar, *Minerals Engineering*, Volume 16, Issue 5, May, Pages 479-482
148. ÇELİK M. S., HANCER M. and MILLER J. D., 2002, Flotation Chemistry of Boron Minerals, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 256, Issue 1, 1 December, Pages 121-131

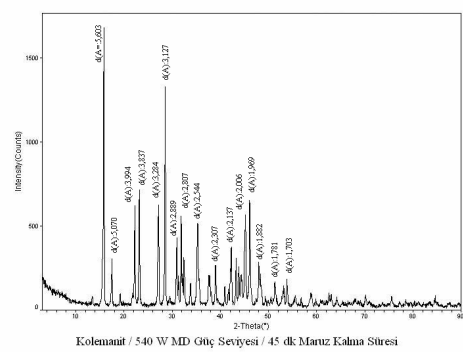
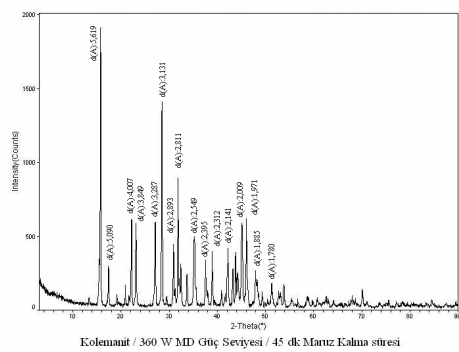
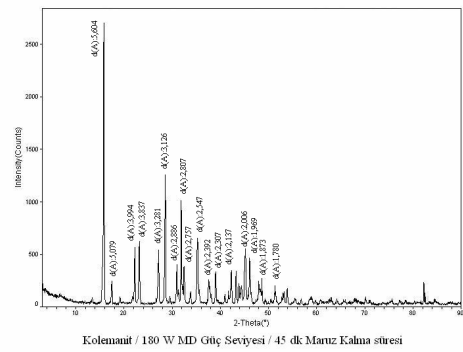
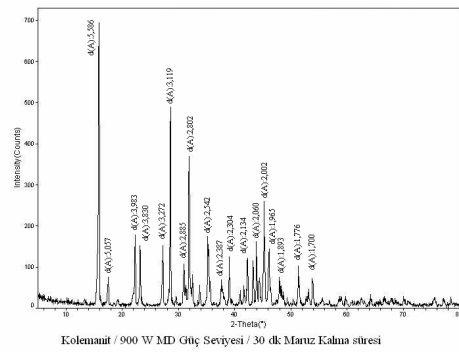
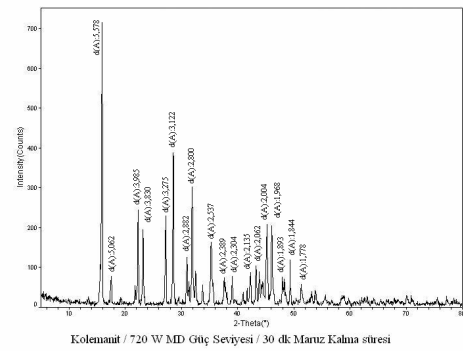
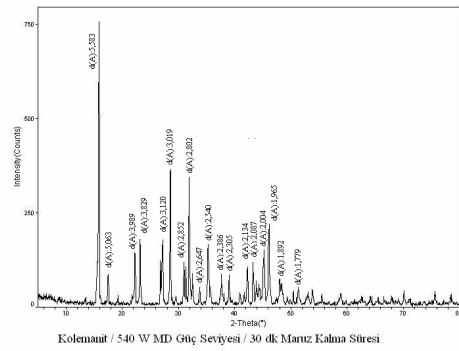
149. CELİK M. S. and YASAR E., 1995, Electrokinetic Properties of Some Hydrated Boron Minerals, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 173, Issue 1, July, Pages 181-185
150. <http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/sanayiha/oik619.pdf>, [Ziyaret Tarihi:14.02.2005]
151. YAŞAR E., 1994, Bor minerallerinin elektrostatik ve elektrokinetik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
152. KÜÇÜK Ö. and KOCAKERİM M. M., 2005 , Optimization of dissolution of ulexite in water saturated with sulphur dioxide, *Chemical Engineering and Processing*, Volume 44, Issue 9, September p 1005-1011.
153. KÜNKÜL A., YAPICI S., KOCAKERİM M. M. and COPUR M., 1997, Dissolution kinetics of ulexite in ammonia solutions saturated with CO₂, *Hydrometallurgy*, Volume 44, Issues 1-2, January, p 135-145.
154. TUNC M., KOCAKERİM M. M., YAPICI S. and BAYRAKÇEKEN S., 1999, Dissolution mechanism of ulexite in H₂SO₄ solution, *Hydrometallurgy*, Volume 51, Issue 3, March, p359-370.
155. GÜLENSOY H. and KOCAKERİM M. M., 1977 , Solubility of ulexite in CO₂ – containing water, *Bulletin of the MINERAL Research and Exploration Institute of Turkey*, No: 89, p:36-47.
156. ALKAN M. and KOCAKERİM M.M., 1987, Dissolution kinetics of ulexite in water saturated by sulphur dioxide, *J. Chem. Tech. Biotechnology*, No:40, p: 215-222.
157. KOCAKERİM M.M. and ALKAN M., 1988, Dissolution of colemanite in SO₂-saturated water, *Hydrometallurgy*, No:19, p:385-392.
158. ALKAN M., KOCAKERİM M.M. and ÇOLAK S., 1985, Dissolution kinetics of colemanite in water saturated by carbon dioxide, *J. Chem. Tech. Biotechnology*, 35A, p:382-386.
159. ÖZKAN Ş.G., 1999 , Practical approach to the solubility of colemanite ores, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, vol:108, , p:c53-c57.
160. ORUMWENSE A.O., NEGERİ T., 2003, The impact of microwave irradiation on the processing of a sulphide ore, *SME Annual Meeting* Feb. 24-26, Cincinnati, Ohio.
161. ÖZKAN Ş.G., KUYUMCU H.Z. ve ÖNAL G., 2007, A general and recent Outlook for borates mining and industry, *Erzmetall*, (Baskıda)
162. KAYTAZ Y., 1990, Cevher hazırlama, *İstanbul Teknik Üniversitesi kütüphanesi*, sayı:1424.

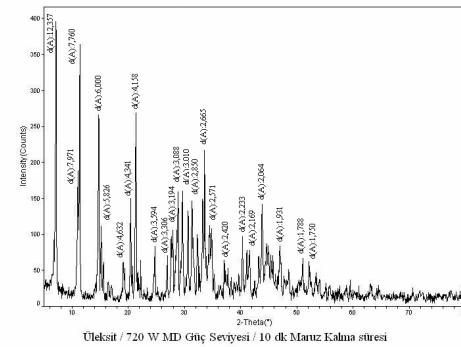
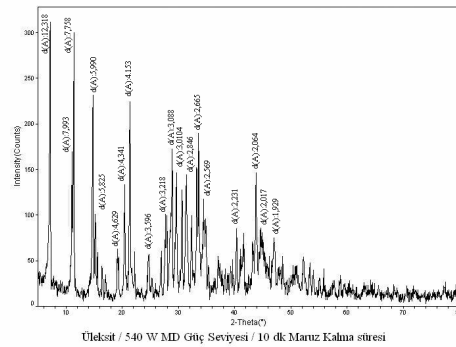
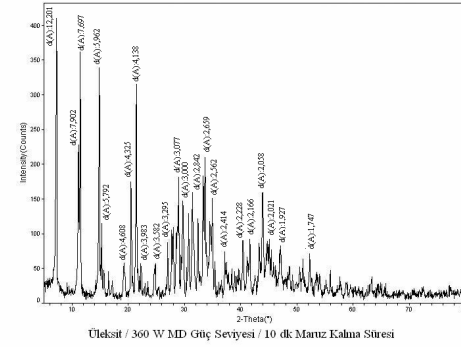
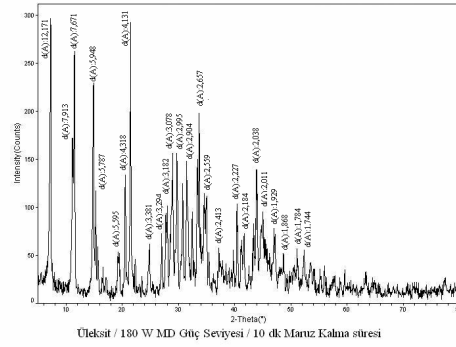
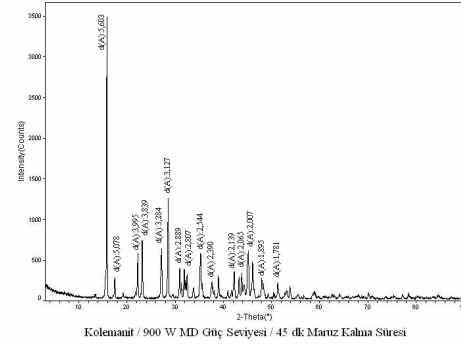
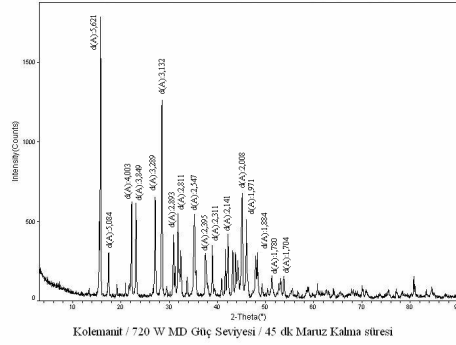
163. ESAT A., 2003, Kırka tinkal atıkları üzerindeki cevher hazırlama ve zenginleştirme çalışmaları, *Yüksek Lisans tezi*, İstanbul Üniversitesi.
164. ÖZKAN Ş.G., 1994, Flotation studies of colemanite ores from the emet deposits of Turkey, Thesis (Ph.D), University of Birmingham.

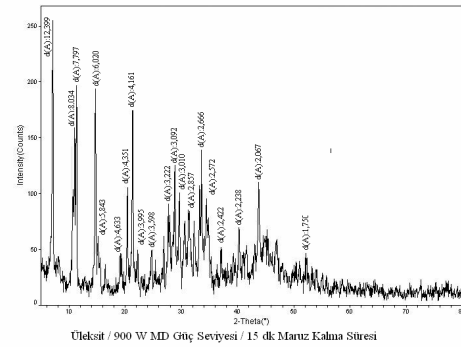
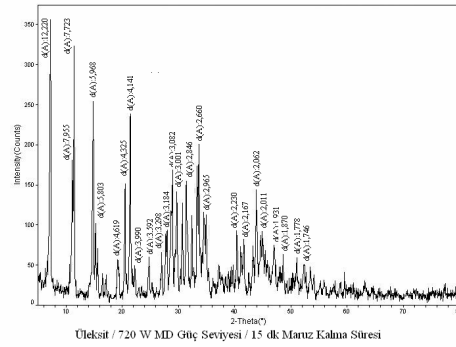
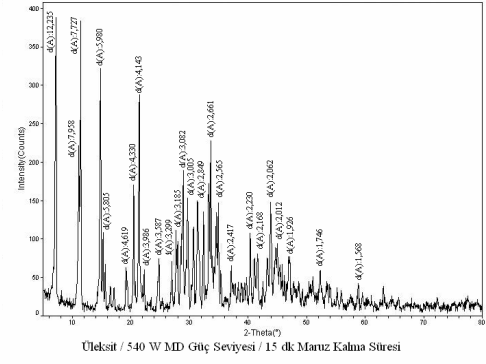
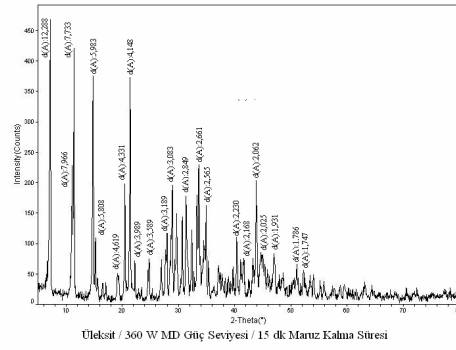
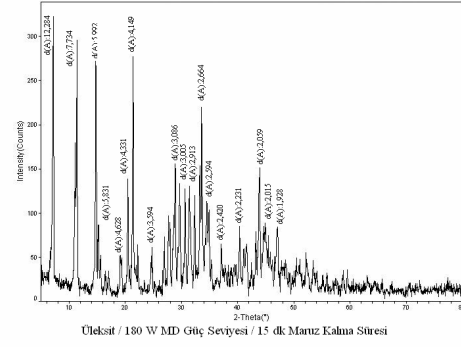
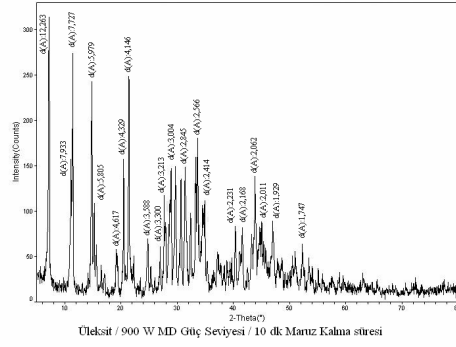
EKLER

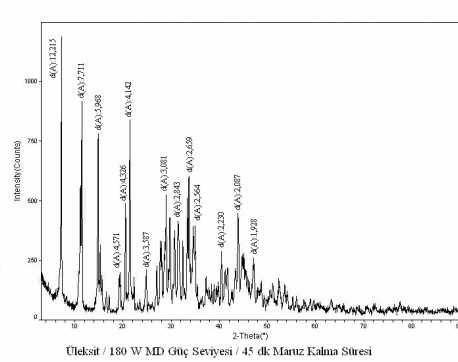
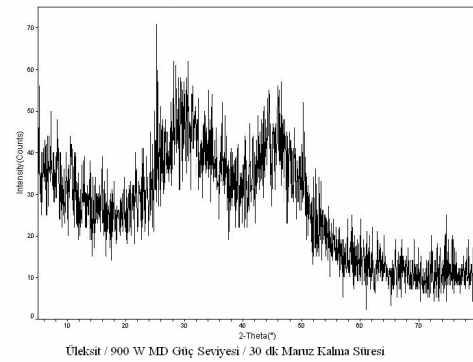
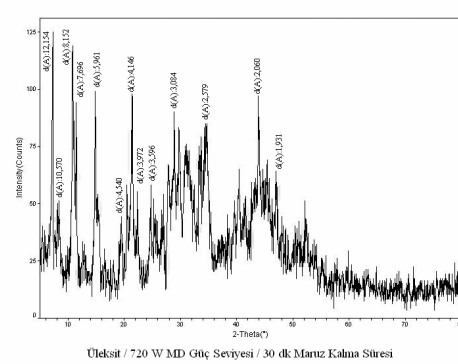
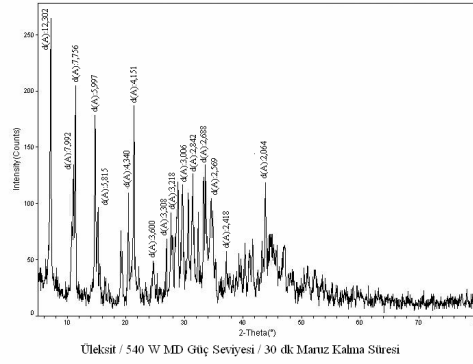
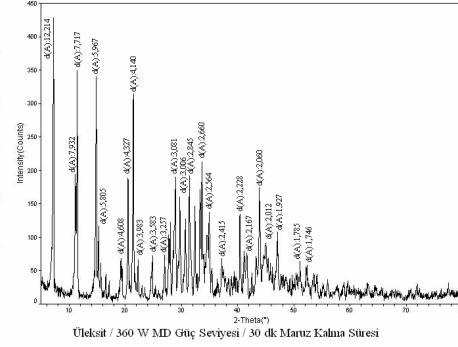
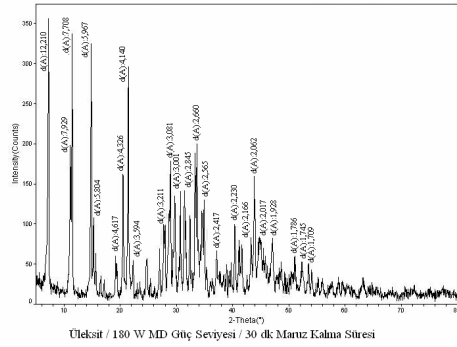
EK A : Kolemanit ve Üleksite Ait Mikroalgaya Bağlı XRD Grafikleri

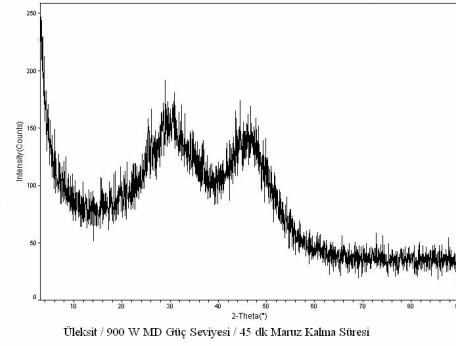
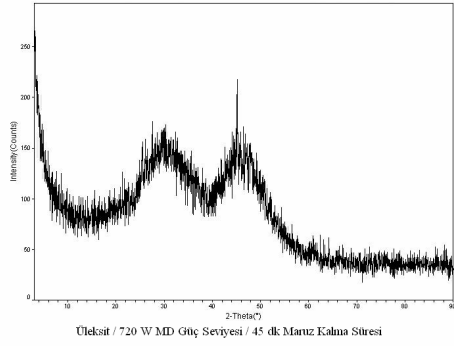
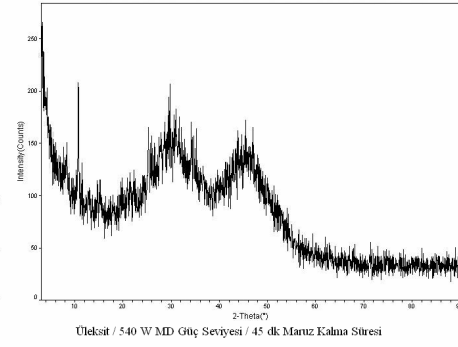
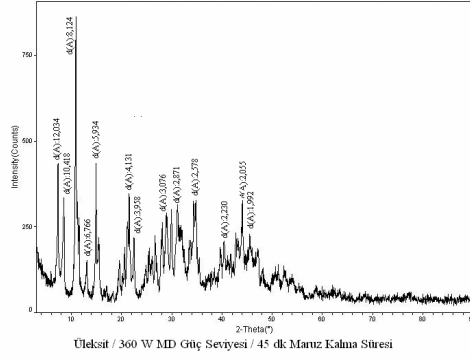












EK B1: Kolemanit ve Üleksitin farklı sıcaklık, PKO ve farklı sürelerdeki çözünürlük katı kayıpları

PKO	Süre %	KOLEMANİT						ÜLEKSİT					
		Oda Sıc		45 °C		60°C		Oda Sıc		45 °C		60°C	
		Katı Kaybı		Katı Kaybı		Katı Kaybı		Katı Kaybı		Katı Kaybı		Katı Kaybı	
	dk	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%	gr	%
5	30	0,40	2,00	0,90	4,50	1,10	5,50	1,70	8,50	3,30	16,50	3,70	18,50
5	45	0,50	2,50	0,90	4,50	1,10	5,50	2,00	10,00	3,30	16,50	3,70	18,50
5	60	0,60	3,00	1,10	5,50	1,20	6,00	2,10	10,50	3,30	16,50	3,70	18,50
5	75	0,60	3,00	0,70	3,50	1,10	5,50	1,90	9,50	3,10	15,50	3,70	18,50
5	90	0,70	3,50	1,10	5,50	1,20	6,00	2,00	10,00	3,40	17,00	3,60	18,00
10	30	0,60	3,00	1,00	5,00	1,00	5,00	1,10	5,50	1,90	9,50	2,00	10,00
10	45	0,70	3,50	1,00	5,00	0,90	4,50	1,40	7,00	2,00	10,00	2,10	10,50
10	60	0,70	3,50	0,90	4,50	0,90	4,50	1,50	7,50	2,40	12,00	1,90	9,50
10	75	0,70	3,50	0,90	4,50	0,70	3,50	1,00	5,00	1,60	8,00	1,80	9,00
10	90	0,70	3,50	0,80	4,00	0,90	4,50	1,20	6,00	1,80	9,00	1,70	8,50
15	30	0,60	3,00	0,70	3,50	0,70	3,50	1,10	5,50	1,20	6,00	1,40	7,00
15	45	0,70	3,50	0,80	4,00	0,80	4,00	1,10	5,50	1,40	7,00	1,60	8,00
15	60	0,70	3,50	0,90	4,50	0,80	4,00	1,10	5,50	1,40	7,00	1,80	9,00
15	75	0,80	4,00	0,80	4,00	0,90	4,50	1,10	5,50	1,20	6,00	1,30	6,50
15	90	0,50	2,50	0,80	4,00	0,90	4,50	1,00	5,00	1,10	5,50	1,20	6,00
20	30	0,60	3,00	0,90	4,50	1,00	5,00	1,10	5,50	0,90	4,50	1,00	5,00
20	45	1,00	5,00	0,80	4,00	0,70	3,50	1,00	5,00	1,20	6,00	1,00	5,00
20	60	0,60	3,00	0,80	4,00	0,70	3,50	0,60	3,00	1,00	5,00	1,20	6,00
20	75	0,70	3,50	0,70	3,50	0,80	4,00	0,60	3,00	1,00	5,00	1,00	5,00
20	90	0,80	4,00	0,70	3,50	0,60	3,00	1,00	5,00	0,90	4,50	1,30	6,50
25	30	0,60	3,00	0,70	3,50	0,70	3,50	0,60	3,00	0,80	4,00	0,70	3,50
25	45	0,50	2,50	0,70	3,50	0,70	3,50	0,90	4,50	0,70	3,50	0,90	4,50
25	60	0,50	2,50	0,60	3,00	0,80	4,00	0,70	3,50	0,60	3,00	1,00	5,00
25	75	0,60	3,00	0,90	4,50	0,80	4,00	0,70	3,50	0,70	3,50	1,00	5,00
25	90	0,40	2,00	0,60	3,00	0,80	4,00	0,80	4,00	0,90	4,50	0,90	4,50

EK B2: Kolemanit ve Üleksit minerali için mikrodalga enerjiye bağlı çözünürlük deney sonuçları

		KOLEMANİT				ÜLEKSİT			
MD GÜCÜ	Maruz Kalma Süresi	MD Ağırlık Kaybı	Bünyeden Uzaklaşan Su		Çözünürlük Katı Kaybı	MD Ağırlık Kaybı	Bünyeden Uzaklaşan Su		Çözünürlük Katı Kaybı
W	dk	%	mol	%	%	%	mol	%	%
180	15	0,33	0,08	1,52	0,33	0,33	0,07	0,94	6,00
360	15	0,67	0,15	3,04	0,67	2,67	0,60	7,51	5,50
540	15	0,67	0,15	3,04	0,67	5,00	1,12	14,08	4,50
720	15	0,67	0,15	3,04	0,67	6,33	1,42	17,83	4,00
900	15	0,67	0,15	3,04	0,67	7,33	1,65	20,65	3,00
180	30	0,67	0,15	3,04	0,67	1,00	0,22	2,82	5,50
360	30	1,00	0,23	4,57	1,00	6,67	1,50	18,77	5,50
540	30	1,67	0,38	7,61	1,67	12,33	2,77	34,72	5,25
720	30	2,00	0,46	9,13	2,00	12,67	2,85	35,66	4,00
900	30	2,33	0,53	10,65	2,33	21,67	4,87	61,00	3,00
180	45	1,33	0,30	6,09	1,33	2,33	0,52	6,57	5,00
360	45	2,33	0,53	10,65	2,33	7,00	1,57	19,71	4,50
540	45	2,33	0,53	10,65	2,33	13,67	3,07	38,48	4,00
720	45	2,67	0,61	12,18	2,67	21,33	4,80	60,06	3,50
900	45	2,67	0,61	12,18	2,67	28,67	6,45	80,71	3,00
180	60	1,33	0,30	6,09	1,33	4,23	0,95	11,92	5,00
360	60	1,67	0,38	7,61	1,67	10,77	2,42	30,31	5,00
540	60	2,33	0,53	10,65	2,33	20,33	4,57	57,24	4,00
720	60	2,67	0,61	12,18	2,67	29,67	6,67	83,52	3,50
900	60	2,67	0,61	12,18	2,67	29,57	6,65	83,24	3,00
180	75	1,33	0,30	6,09	1,33	6,33	1,42	17,83	6,00
360	75	2,33	0,53	10,65	2,33	17,00	3,82	47,86	6,00
540	75	2,33	0,53	10,65	2,33	28,33	6,37	79,77	4,00
720	75	2,67	0,61	12,18	2,67	30,33	6,82	85,40	3,50
900	75	2,67	0,61	12,18	2,67	31,33	7,05	88,21	3,00

EK C1 : -8+4 mm, 5 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				ÜLEKSİT MİNERALİ			
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	18,34	100,00	18,34		25,66	100,00	25,66
-4 +2	6,48	81,66	24,82		7,20	74,34	32,86
-2 +1	1,93	75,18	26,75		1,52	67,14	34,38
-1 +0,5	1,32	73,25	28,06		1,01	65,62	35,40
-0,5 +0,3	1,52	71,94	29,58		1,52	64,60	36,92
-0,3 +0,212	1,93	70,42	31,51		2,94	63,08	39,86
-0,212 +0,150	2,33	68,49	33,84		4,36	60,14	44,22
-0,150 +0	66,16	66,16	100,00		55,78	55,78	100,00
Toplam	100,00				100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	26,58	100,00	26,58		25,46	100,00	25,46
-4 +2	5,82	73,42	32,40		6,65	74,54	32,11
-2 +1	1,20	67,60	33,60		0,92	67,89	33,03
-1 +0,5	0,90	66,40	34,50		0,82	66,97	33,84
-0,5 +0,3	1,00	65,50	35,51		1,33	66,16	35,17
-0,3 +0,212	1,50	64,49	37,01		2,76	64,83	37,93
-0,212 +0,150	2,61	62,99	39,62		4,50	62,07	42,43
-0,150 +0	60,38	60,38	100,00		57,57	57,57	100,00
Toplam	100,00				100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	17,57	100,00	17,57		23,69	100,00	23,69
-4 +2	6,18	82,43	23,75		8,67	76,31	32,36
-2 +1	1,57	76,25	25,32		1,51	67,64	33,87
-1 +0,5	1,18	74,68	26,50		1,31	66,13	35,18
-0,5 +0,3	1,37	73,50	27,87		2,12	64,82	37,30
-0,3 +0,212	1,86	72,13	29,74		3,33	62,70	40,63
-0,212 +0,150	3,34	70,26	33,07		4,84	59,38	45,46
-0,150 +0	66,93	66,93	100,00		54,54	54,54	100,00
Toplam	100,00				100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	20,12	100,00	20,12		20,89	100,00	20,89
-4 +2	4,02	79,88	24,14		5,17	79,11	26,06
-2 +1	1,01	75,86	25,15		1,12	73,94	27,18
-1 +0,5	0,91	74,85	26,06		1,12	72,82	28,30
-0,5 +0,3	1,21	73,94	27,26		2,03	71,70	30,32
-0,3 +0,212	1,81	72,74	29,07		3,55	69,68	33,87
-0,212 +0,150	3,82	70,93	32,90		5,58	66,13	39,45
-0,150 +0	67,10	67,10	100,00		60,55	60,55	100,00
Toplam	100,00				100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	18,71	100,00	18,71		16,77	100,00	16,77
-4 +2	5,66	81,29	24,37		6,26	83,23	23,03
-2 +1	1,11	75,63	25,48		1,41	76,97	24,44
-1 +0,5	0,81	74,52	26,29		1,21	75,56	25,66
-0,5 +0,3	1,01	73,71	27,30		2,42	74,34	28,08
-0,3 +0,212	1,72	72,70	29,02		3,94	71,92	32,02
-0,212 +0,150	3,54	70,98	32,56		5,76	67,98	37,78
-0,150 +0	67,44	67,44	100,00		62,22	62,22	100,00
Toplam	100,00				100,00		

EK C2: -8+4 mm, 10 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				MM	ÜLEKSİT MİNERALİ		
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	22,74	100,00	22,74		31,22	100,00	31,22
-4 +2	5,73	77,26	28,47		9,52	68,78	40,74
-2 +1	1,31	71,53	29,78		2,15	59,26	42,89
-1 +0,5	1,11	70,22	30,89		1,23	57,11	44,11
-0,5 +0,3	1,21	69,11	32,09		1,74	55,89	45,85
-0,3 +0,212	1,71	67,91	33,80		2,25	54,15	48,11
-0,212 +0,150	2,92	66,20	36,72		4,81	51,89	52,92
-0,150 +0	63,28	63,28	100,00		47,08	47,08	100,00
Toplam	100,00				100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	25,23	100,00	25,23		21,56	100,00	21,56
-4 +2	6,03	74,77	31,26		6,98	78,44	28,54
-2 +1	1,31	68,74	32,56		1,42	71,46	29,96
-1 +0,5	0,70	67,44	33,27		1,21	70,04	31,17
-0,5 +0,3	1,21	66,73	34,47		2,02	68,83	33,20
-0,3 +0,212	1,71	65,53	36,18		3,44	66,80	36,64
-0,212 +0,150	3,02	63,82	39,20		5,67	63,36	42,31
-0,150 +0	60,80	60,80	100,00		57,69	57,69	100,00
Toplam	100,00				100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	21,84	100,00	21,84		19,37	100,00	19,37
-4 +2	6,17	78,16	28,01		4,37	80,63	23,74
-2 +1	1,11	71,99	29,12		1,23	76,26	24,98
-1 +0,5	0,91	70,88	30,03		1,14	75,02	26,12
-0,5 +0,3	1,11	69,97	31,14		2,09	73,88	28,21
-0,3 +0,212	1,62	68,86	32,76		3,51	71,79	31,72
-0,212 +0,150	2,83	67,24	35,59		4,94	68,28	36,66
-0,150 +0	64,41	64,41	100,00		63,34	63,34	100,00
Toplam	100,00				100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	21,15	100,00	21,15		15,03	100,00	15,03
-4 +2	5,34	78,85	26,49		4,97	84,97	20,00
-2 +1	1,21	73,51	27,69		0,81	80,00	20,81
-1 +0,5	0,81	72,31	28,50		1,02	79,19	21,83
-0,5 +0,3	1,21	71,50	29,71		2,13	78,17	23,96
-0,3 +0,212	1,71	70,29	31,42		3,96	76,04	27,92
-0,212 +0,150	3,22	68,58	34,64		5,89	72,08	33,81
-0,150 +0	65,36	65,36	100,00		66,19	66,19	100,00
Toplam	100,00				100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	20,67	100,00	20,67		15,52	100,00	15,52
-4 +2	7,96	79,33	28,63		3,70	84,48	19,22
-2 +1	1,31	71,37	29,94		0,92	80,78	20,14
-1 +0,5	1,71	70,06	31,65		1,03	79,86	21,17
-0,5 +0,3	1,21	68,35	32,86		2,06	78,83	23,23
-0,3 +0,212	2,02	67,14	34,88		3,49	76,77	26,72
-0,212 +0,150	4,23	65,12	39,11		6,06	73,28	32,79
-0,150 +0	60,89	60,89	100,00		67,21	67,21	100,00
Toplam	100,00				100,00		

EK C3: -8+4 mm, 15 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				ÜLEKSİT MİNERALİ		
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	22,67	100,00	22,67	32,62	100,00	32,62
-4 +2	6,32	77,33	28,99	11,42	67,38	44,04
-2 +1	1,30	71,01	30,29	2,04	55,96	46,08
-1 +0,5	0,90	69,71	31,19	1,33	53,92	47,40
-0,5 +0,3	1,20	68,81	32,40	1,43	52,60	48,83
-0,3 +0,212	1,91	67,60	34,30	2,24	51,17	51,07
-0,212 +0,150	3,11	65,70	37,41	4,49	48,93	55,56
-0,150 +0	62,59	62,59	100,00	44,44	44,44	100,00
Toplam	100,00			100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	19,18	100,00	19,18	12,58	100,00	12,58
-4 +2	5,12	80,82	24,30	4,93	87,42	17,51
-2 +1	1,41	75,70	25,70	0,91	82,49	18,41
-1 +0,5	0,90	74,30	26,61	1,01	81,59	19,42
-0,5 +0,3	1,00	73,39	27,61	2,21	80,58	21,63
-0,3 +0,212	1,41	72,39	29,02	4,23	78,37	25,86
-0,212 +0,150	3,01	70,98	32,03	6,94	74,14	32,80
-0,150 +0	67,97	67,97	100,00	67,20	67,20	100,00
Toplam	100,00			100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	21,22	100,00	21,22	15,47	100,00	15,47
-4 +2	7,47	78,78	28,69	3,32	84,53	18,80
-2 +1	1,59	71,31	30,28	0,52	81,20	19,31
-1 +0,5	0,90	69,72	31,18	0,73	80,69	20,04
-0,5 +0,3	1,29	68,82	32,47	1,56	79,96	21,60
-0,3 +0,212	2,29	67,53	34,76	3,53	78,40	25,13
-0,212 +0,150	3,69	65,24	38,45	5,50	74,87	30,63
-0,150 +0	61,55	61,55	100,00	69,37	69,37	100,00
Toplam	100,00			100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	19,00	100,00	19,00	11,19	100,00	11,19
-4 +2	4,20	81,00	23,20	2,30	88,81	13,49
-2 +1	1,40	76,80	24,60	0,52	86,51	14,02
-1 +0,5	1,00	75,40	25,60	0,63	85,98	14,64
-0,5 +0,3	1,10	74,40	26,70	1,36	85,36	16,00
-0,3 +0,212	1,60	73,30	28,30	3,35	84,00	19,35
-0,212 +0,150	3,30	71,70	31,60	4,81	80,65	24,16
-0,150 +0	68,40	68,40	100,00	75,84	75,84	100,00
Toplam	100,00			100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	18,18	100,00	18,18	12,67	100,00	12,67
-4 +2	4,34	81,82	22,53	2,01	87,33	14,68
-2 +1	1,11	77,47	23,64	0,53	85,32	15,21
-1 +0,5	0,91	76,36	24,55	0,95	84,79	16,16
-0,5 +0,3	1,11	75,45	25,66	1,27	83,84	17,42
-0,3 +0,212	1,52	74,34	27,17	3,70	82,58	21,12
-0,212 +0,150	3,74	72,83	30,91	4,44	78,88	25,55
-0,150 +0	69,09	69,09	100,00	74,45	74,45	100,00
Toplam	100,00			100,00		

EK C4: -8+4 mm, 30 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				ÜLEKSİT MİNERALİ		
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	31,00	100,00	31,00	19,01	100,00	19,01
-4 +2	4,40	69,00	35,40	7,09	80,99	26,10
-2 +1	1,10	64,60	36,50	1,23	73,90	27,34
-1 +0,5	0,50	63,50	37,00	1,13	72,66	28,47
-0,5 +0,3	0,80	63,00	37,80	2,16	71,53	30,63
-0,3 +0,212	1,60	62,20	39,40	3,39	69,37	34,02
-0,212 +0,150	2,90	60,60	42,30	5,34	65,98	39,36
-0,150 +0	57,70	57,70	100,00	60,64	60,64	100,00
Toplam	100,00			100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	19,00	100,00	19,00	14,65	100,00	14,65
-4 +2	6,50	81,00	25,50	2,56	85,35	17,21
-2 +1	1,40	74,50	26,90	0,51	82,79	17,73
-1 +0,5	1,00	73,10	27,90	0,72	82,27	18,44
-0,5 +0,3	1,30	72,10	29,20	1,74	81,56	20,18
-0,3 +0,212	2,10	70,80	31,30	3,18	79,82	23,36
-0,212 +0,150	4,10	68,70	35,40	6,25	76,64	29,61
-0,150 +0	64,60	64,60	100,00	70,39	70,39	100,00
Toplam	100,00			100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	19,06	100,00	19,06	2,74	100,00	2,74
-4 +2	6,22	80,94	25,28	0,11	97,26	2,85
-2 +1	1,50	74,72	26,78	0,21	97,15	3,06
-1 +0,5	1,00	73,22	27,78	0,84	96,94	3,90
-0,5 +0,3	1,20	72,22	28,99	1,37	96,10	5,27
-0,3 +0,212	1,91	71,01	30,89	3,59	94,73	8,86
-0,212 +0,150	3,31	69,11	34,20	4,54	91,14	13,40
-0,150 +0	65,80	65,80	100,00	86,60	86,60	100,00
Toplam	100,00			100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	18,93	100,00	18,93	1,47	100,00	1,47
-4 +2	6,24	81,07	25,18	0,00	98,53	1,47
-2 +1	1,41	74,82	26,59	0,42	98,53	1,89
-1 +0,5	0,70	73,41	27,29	1,37	98,11	3,26
-0,5 +0,3	1,11	72,71	28,40	1,16	96,74	4,42
-0,3 +0,212	1,71	71,60	30,11	1,89	95,58	6,32
-0,212 +0,150	3,63	69,89	33,74	2,95	93,68	9,26
-0,150 +0	66,26	66,26	100,00	90,74	90,74	100,00
Toplam	100,00			100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	18,40	100,00	18,40	0,66	100,00	0,66
-4 +2	4,45	81,60	22,85	0,00	99,34	0,66
-2 +1	1,21	77,15	24,06	0,00	99,34	0,66
-1 +0,5	0,81	75,94	24,87	0,26	99,34	0,92
-0,5 +0,3	1,11	75,13	25,99	0,26	99,08	1,18
-0,3 +0,212	1,72	74,01	27,70	1,32	98,82	2,50
-0,212 +0,150	3,13	72,30	30,84	3,16	97,50	5,66
-0,150 +0	69,16	69,16	100,00	94,34	94,34	100,00
Toplam	100,00			100,00		

EK C5: -4+2 mm, 5 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				ÜLEKSİT MİNERALİ		
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,41	100,00	1,41	2,48	100,00	2,48
-2 +1	0,40	98,59	1,81	0,50	97,52	2,98
-1 +0,5	0,30	98,19	2,11	0,79	97,02	3,77
-0,5 +0,3	0,80	97,89	2,92	3,57	96,23	7,35
-0,3 +0,212	2,21	97,08	5,13	7,25	92,65	14,60
-0,212 +0,150	6,04	94,87	11,17	9,53	85,40	24,13
-0,150 +0	88,83	88,83	100,00	75,87	75,87	100,00
Toplam	100,00			100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,00	100,00	1,00	2,30	100,00	2,30
-2 +1	0,30	99,00	1,31	0,40	97,70	2,69
-1 +0,5	0,30	98,69	1,61	0,70	97,31	3,39
-0,5 +0,3	0,70	98,39	2,31	3,19	96,61	6,59
-0,3 +0,212	2,01	97,69	4,32	6,79	93,41	13,37
-0,212 +0,150	6,02	95,68	10,34	9,18	86,63	22,55
-0,150 +0	89,66	89,66	100,00	77,45	77,45	100,00
Toplam	100,00			100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,21	100,00	1,21	2,20	100,00	2,20
-2 +1	0,30	98,79	1,51	0,40	97,80	2,60
-1 +0,5	0,30	98,49	1,81	0,80	97,40	3,40
-0,5 +0,3	0,70	98,19	2,52	3,80	96,60	7,20
-0,3 +0,212	2,01	97,48	4,53	7,10	92,80	14,30
-0,212 +0,150	6,14	95,47	10,67	9,50	85,70	23,80
-0,150 +0	89,33	89,33	100,00	76,20	76,20	100,00
Toplam	100,00			100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,01	100,00	1,01	0,81	100,00	0,81
-2 +1	0,20	98,99	1,21	0,10	99,19	0,91
-1 +0,5	0,30	98,79	1,51	0,40	99,09	1,31
-0,5 +0,3	0,70	98,49	2,21	2,32	98,69	3,63
-0,3 +0,212	2,01	97,79	4,23	5,85	96,37	9,48
-0,212 +0,150	5,94	95,77	10,16	8,67	90,52	18,15
-0,150 +0	89,84	89,84	100,00	81,85	81,85	100,00
Toplam	100,00			100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,90	100,00	0,90	1,31	100,00	1,31
-2 +1	0,50	99,10	1,41	0,40	98,69	1,71
-1 +0,5	0,40	98,59	1,81	0,70	98,29	2,41
-0,5 +0,3	0,80	98,19	2,61	3,21	97,59	5,62
-0,3 +0,212	2,41	97,39	5,03	6,43	94,38	12,05
-0,212 +0,150	5,83	94,97	10,85	9,64	87,95	21,69
-0,150 +0	89,15	89,15	100,00	78,31	78,31	100,00
Toplam	100,00			100,00		

EK C6: -4+2 mm, 10 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				ÜLEKSİT MİNERALİ		
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,51	100,00	1,51	3,56	100,00	3,56
-2 +1	0,60	98,49	2,12	0,69	96,44	4,26
-1 +0,5	0,50	97,88	2,62	1,39	95,74	5,64
-0,5 +0,3	1,01	97,38	3,63	4,75	94,36	10,40
-0,3 +0,212	2,52	96,37	6,15	7,03	89,60	17,43
-0,212 +0,150	5,24	93,85	11,39	10,30	82,57	27,72
-0,150 +0	88,61	88,61	100,00	72,28	72,28	100,00
Toplam	100,00			100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,81	100,00	1,81	1,40	100,00	1,40
-2 +1	0,50	98,19	2,31	0,30	98,60	1,70
-1 +0,5	0,50	97,69	2,81	0,70	98,30	2,40
-0,5 +0,3	0,90	97,19	3,71	3,41	97,60	5,81
-0,3 +0,212	2,41	96,29	6,12	6,41	94,19	12,22
-0,212 +0,150	5,62	93,88	11,75	9,92	87,78	22,14
-0,150 +0	88,25	88,25	100,00	77,86	77,86	100,00
Toplam	100,00			100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,01	100,00	1,01	1,11	100,00	1,11
-2 +1	0,40	98,99	1,42	0,20	98,89	1,31
-1 +0,5	0,40	98,58	1,82	0,50	98,69	1,82
-0,5 +0,3	1,01	98,18	2,83	2,72	98,18	4,54
-0,3 +0,212	2,53	97,17	5,36	5,75	95,46	10,29
-0,212 +0,150	5,76	94,64	11,12	8,88	89,71	19,17
-0,150 +0	88,88	88,88	100,00	80,83	80,83	100,00
Toplam	100,00			100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,50	100,00	1,50	0,51	100,00	0,51
-2 +1	0,50	98,50	2,00	0,20	99,49	0,71
-1 +0,5	0,50	98,00	2,51	0,30	99,29	1,02
-0,5 +0,3	0,80	97,49	3,31	2,44	98,98	3,46
-0,3 +0,212	2,51	96,69	5,81	5,89	96,54	9,35
-0,212 +0,150	6,01	94,19	11,82	8,54	90,65	17,89
-0,150 +0	88,18	88,18	100,00	82,11	82,11	100,00
Toplam	100,00			100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,31	100,00	1,31	0,31	100,00	0,31
-2 +1	0,60	98,69	1,91	0,21	99,69	0,51
-1 +0,5	0,40	98,09	2,31	0,51	99,49	1,03
-0,5 +0,3	1,01	97,69	3,32	2,27	98,97	3,30
-0,3 +0,212	2,61	96,68	5,93	5,25	96,70	8,55
-0,212 +0,150	5,03	94,07	10,95	8,24	91,45	16,79
-0,150 +0	89,05	89,05	100,00	83,21	83,21	100,00
Toplam	100,00			100,00		

EK C7: -4+2 mm, 15 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				ÜLEKSİT MİNERALİ		
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,21	100,00	1,21	4,80	100,00	4,80
-2 +1	0,50	98,79	1,71	0,80	95,20	5,59
-1 +0,5	0,40	98,29	2,11	1,50	94,41	7,09
-0,5 +0,3	0,70	97,89	2,82	5,29	92,91	12,39
-0,3 +0,212	2,01	97,18	4,83	6,19	87,61	18,58
-0,212 +0,150	6,14	95,17	10,97	9,29	81,42	27,87
-0,150 +0	89,03	89,03	100,00	72,13	72,13	100,00
Toplam	100,00			100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,21	100,00	1,21	2,30	100,00	2,30
-2 +1	0,40	98,79	1,61	0,40	97,70	2,71
-1 +0,5	0,30	98,39	1,91	0,90	97,29	3,61
-0,5 +0,3	0,70	98,09	2,62	4,01	96,39	7,62
-0,3 +0,212	1,81	97,38	4,43	7,21	92,38	14,83
-0,212 +0,150	5,74	95,57	10,17	8,82	85,17	23,65
-0,150 +0	89,83	89,83	100,00	76,35	76,35	100,00
Toplam	100,00			100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,01	100,00	1,01	0,71	100,00	0,71
-2 +1	0,30	98,99	1,32	0,10	99,29	0,82
-1 +0,5	0,30	98,68	1,62	0,51	99,18	1,33
-0,5 +0,3	0,51	98,38	2,13	2,75	98,67	4,08
-0,3 +0,212	1,72	97,87	3,85	6,01	95,92	10,09
-0,212 +0,150	5,06	96,15	8,91	8,56	89,91	18,65
-0,150 +0	91,09	91,09	100,00	81,35	81,35	100,00
Toplam	100,00			100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,11	100,00	1,11	0,11	100,00	0,11
-2 +1	0,30	98,89	1,41	0,22	99,89	0,33
-1 +0,5	0,30	98,59	1,71	0,76	99,67	1,08
-0,5 +0,3	0,71	98,29	2,42	1,41	98,92	2,49
-0,3 +0,212	1,81	97,58	4,23	3,90	97,51	6,39
-0,212 +0,150	5,44	95,77	9,68	6,50	93,61	12,89
-0,150 +0	90,32	90,32	100,00	87,11	87,11	100,00
Toplam	100,00			100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,01	100,00	1,01	0,23	100,00	0,23
-2 +1	0,30	98,99	1,31	0,12	99,77	0,35
-1 +0,5	0,30	98,69	1,61	0,92	99,65	1,27
-0,5 +0,3	0,60	98,39	2,21	1,04	98,73	2,31
-0,3 +0,212	1,61	97,79	3,82	4,04	97,69	6,35
-0,212 +0,150	5,63	96,18	9,46	5,20	93,65	11,55
-0,150 +0	90,54	90,54	100,00	88,45	88,45	100,00
Toplam	100,00			100,00		

EK C8: -4+2 mm, 30 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ

ÜLEKSİT MİNERALİ

180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,92	100,00	1,92		1,29	100,00	1,29
-2 +1	0,40	98,08	2,32		0,10	98,71	1,38
-1 +0,5	0,40	97,68	2,72		0,49	98,62	1,88
-0,5 +0,3	0,81	97,28	3,53		3,36	98,12	5,24
-0,3 +0,212	2,02	96,47	5,55		6,92	94,76	12,17
-0,212 +0,150	5,35	94,45	10,90		9,99	87,83	22,16
-0,150 +0	89,10	89,10	100,00		77,84	77,84	100,00
Toplam	100,00				100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,00	100,00	1,00		0,10	100,00	0,10
-2 +1	0,30	99,00	1,30		0,10	99,90	0,21
-1 +0,5	0,30	98,70	1,60		0,31	99,79	0,52
-0,5 +0,3	0,70	98,40	2,31		1,96	99,48	2,48
-0,3 +0,212	2,11	97,69	4,41		5,17	97,52	7,65
-0,212 +0,150	5,02	95,59	9,43		8,89	92,35	16,55
-0,150 +0	90,57	90,57	100,00		83,45	83,45	100,00
Toplam	100,00				100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,53	100,00	1,53		0,11	100,00	0,11
-2 +1	0,41	98,47	1,94		0,23	99,89	0,34
-1 +0,5	0,41	98,06	2,35		0,34	99,66	0,68
-0,5 +0,3	0,92	97,65	3,27		1,02	99,32	1,70
-0,3 +0,212	2,35	96,73	5,61		3,86	98,30	5,56
-0,212 +0,150	5,31	94,39	10,92		3,75	94,44	9,31
-0,150 +0	89,08	89,08	100,00		90,69	90,69	100,00
Toplam	100,00				100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	1,01	100,00	1,01		0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,30	98,99	1,32		0,23	100,00	0,23
-1 +0,5	0,30	98,68	1,62		1,04	99,77	1,27
-0,5 +0,3	0,71	98,38	2,33		1,04	98,73	2,31
-0,3 +0,212	2,03	97,67	4,36		2,20	97,69	4,51
-0,212 +0,150	5,47	95,64	9,83		2,43	95,49	6,94
-0,150 +0	90,17	90,17	100,00		93,06	93,06	100,00
Toplam	100,00				100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,91	100,00	0,91		0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,30	99,09	1,22		0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,30	98,78	1,52		0,14	100,00	0,14
-0,5 +0,3	0,61	98,48	2,13		0,28	99,86	0,42
-0,3 +0,212	1,83	97,87	3,96		0,28	99,58	0,71
-0,212 +0,150	5,18	96,04	9,14		0,99	99,29	1,69
-0,150 +0	90,86	90,86	100,00		98,31	98,31	100,00
Toplam	100,00				100,00		

EK C9: -2+1 mm, 5 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				ÜLEKSİT MİNERALİ		
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,10	100,00	0,10	0,40	100,00	0,40
-0,5 +0,3	0,20	99,90	0,30	3,91	99,60	4,31
-0,3 +0,212	1,30	99,70	1,60	8,92	95,69	13,23
-0,212 +0,150	5,12	98,40	6,72	9,82	86,77	23,05
-0,150 +0	93,28	93,28	100,00	76,95	76,95	100,00
Toplam	100,00			100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,10	100,00	0,10	0,20	100,00	0,20
-0,5 +0,3	0,30	99,90	0,40	1,51	99,80	1,71
-0,3 +0,212	1,20	99,60	1,60	5,84	98,29	7,55
-0,212 +0,150	4,61	98,40	6,22	8,66	92,45	16,21
-0,150 +0	93,78	93,78	100,00	83,79	83,79	100,00
Toplam	100,00			100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00	0,30	100,00	0,30
-0,5 +0,3	0,20	100,00	0,20	2,61	99,70	2,91
-0,3 +0,212	1,31	99,80	1,51	7,34	97,09	10,25
-0,212 +0,150	5,33	98,49	6,84	9,75	89,75	20,00
-0,150 +0	93,16	93,16	100,00	80,00	80,00	100,00
Toplam	100,00			100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,10	100,00	0,10	0,50	100,00	0,50
-0,5 +0,3	0,20	99,90	0,30	2,99	99,50	3,49
-0,3 +0,212	1,31	99,70	1,61	7,68	96,51	11,17
-0,212 +0,150	4,84	98,39	6,46	9,37	88,83	20,54
-0,150 +0	93,54	93,54	100,00	79,46	79,46	100,00
Toplam	100,00			100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00	0,30	100,00	0,30
-0,5 +0,3	0,20	100,00	0,20	1,72	99,70	2,03
-0,3 +0,212	1,31	99,80	1,51	5,78	97,97	7,80
-0,212 +0,150	5,13	98,49	6,64	8,81	92,20	16,62
-0,150 +0	93,36	93,36	100,00	83,38	83,38	100,00
Toplam	100,00			100,00		

EK C10: -2+1 mm, 10 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ

180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00
-0,5 +0,3	0,31	100,00	0,31
-0,3 +0,212	1,45	99,69	1,76
-0,212 +0,150	3,84	98,24	5,60
-0,150 +0	94,40	94,40	100,00
Toplam	100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00
-0,5 +0,3	0,31	100,00	0,31
-0,3 +0,212	1,65	99,69	1,96
-0,212 +0,150	5,77	98,04	7,73
-0,150 +0	92,27	92,27	100,00
Toplam	100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00
-0,5 +0,3	0,42	100,00	0,42
-0,3 +0,212	1,66	99,58	2,08
-0,212 +0,150	4,26	97,92	6,33
-0,150 +0	93,67	93,67	100,00
Toplam	100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00
-0,5 +0,3	0,31	100,00	0,31
-0,3 +0,212	1,54	99,69	1,85
-0,212 +0,150	5,24	98,15	7,09
-0,150 +0	92,91	92,91	100,00
Toplam	100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00
-0,5 +0,3	0,41	100,00	0,41
-0,3 +0,212	1,54	99,59	1,95
-0,212 +0,150	5,44	98,05	7,39
-0,150 +0	92,61	92,61	100,00
Toplam	100,00		

ÜLEKSİT MİNERALİ

Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,20	100,00	0,20
1,42	99,80	1,63
5,59	98,37	7,22
9,15	92,78	16,36
83,64	83,64	100,00
100,00		
Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,20	100,00	0,20
1,61	99,80	1,81
5,43	98,19	7,24
9,46	92,76	16,70
83,30	83,30	100,00
100,00		
Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,31	100,00	0,31
0,82	99,69	1,13
4,11	98,87	5,24
9,66	94,76	14,90
85,10	85,10	100,00
100,00		
Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,10	100,00	0,10
1,12	99,90	1,23
4,70	98,77	5,93
8,79	94,07	14,72
85,28	85,28	100,00
100,00		
Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,42	100,00	0,42
1,05	99,58	1,47
3,77	98,53	5,24
10,05	94,76	15,29
84,71	84,71	100,00
100,00		

EK C11: -2+1 mm, 15 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ				MM	ÜLEKSİT MİNERALİ		
180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,10	100,00	0,10		0,30	100,00	0,30
-0,5 +0,3	0,20	99,90	0,30		3,29	99,70	3,59
-0,3 +0,212	1,21	99,70	1,52		7,39	96,41	10,98
-0,212 +0,150	4,86	98,48	6,38		8,18	89,02	19,16
-0,150 +0	93,62	93,62	100,00		80,84	80,84	100,00
Toplam	100,00				100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,10	100,00	0,10		0,20	100,00	0,20
-0,5 +0,3	0,10	99,90	0,20		1,80	99,80	2,00
-0,3 +0,212	1,11	99,80	1,32		5,69	98,00	7,69
-0,212 +0,150	5,07	98,68	6,38		9,79	92,31	17,48
-0,150 +0	93,62	93,62	100,00		82,52	82,52	100,00
Toplam	100,00				100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00		0,31	100,00	0,31
-0,5 +0,3	0,20	100,00	0,20		0,84	99,69	1,15
-0,3 +0,212	1,22	99,80	1,42		3,78	98,85	4,93
-0,212 +0,150	4,66	98,58	6,08		7,14	95,07	12,07
-0,150 +0	93,92	93,92	100,00		87,93	87,93	100,00
Toplam	100,00				100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00		0,74	100,00	0,74
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00		0,74	99,26	1,48
-0,5 +0,3	0,20	100,00	0,20		0,95	98,52	2,43
-0,3 +0,212	1,11	99,80	1,31		3,38	97,57	5,80
-0,212 +0,150	4,44	98,69	5,75		7,70	94,20	13,50
-0,150 +0	94,25	94,25	100,00		86,50	86,50	100,00
Toplam	100,00				100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %		Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00		0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00		0,23	100,00	0,23
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00		1,03	99,77	1,26
-0,5 +0,3	0,20	100,00	0,20		0,91	98,74	2,17
-0,3 +0,212	1,12	99,80	1,32		2,51	97,83	4,68
-0,212 +0,150	4,47	98,68	5,79		4,11	95,32	8,79
-0,150 +0	94,21	94,21	100,00		91,21	91,21	100,00
Toplam	100,00				100,00		

EK C12: -2+1 mm, 30 dk Mikrodalgaya maruz kalma öğütme deney sonuçları

KOLEMANİT MİNERALİ

180 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00
-0,5 +0,3	0,20	100,00	0,20
-0,3 +0,212	1,32	99,80	1,52
-0,212 +0,150	5,16	98,48	6,68
-0,150 +0	93,32	93,32	100,00
Toplam	100,00		
360 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00
-0,5 +0,3	0,20	100,00	0,20
-0,3 +0,212	1,31	99,80	1,52
-0,212 +0,150	4,95	98,48	6,47
-0,150 +0	93,53	93,53	100,00
Toplam	100,00		
540 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,10	100,00	0,10
-0,5 +0,3	0,20	99,90	0,30
-0,3 +0,212	1,31	99,70	1,61
-0,212 +0,150	4,42	98,39	6,03
-0,150 +0	93,97	93,97	100,00
Toplam	100,00		
720 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,10	100,00	0,10
-0,5 +0,3	0,20	99,90	0,30
-0,3 +0,212	1,21	99,70	1,52
-0,212 +0,150	4,96	98,48	6,48
-0,150 +0	93,52	93,52	100,00
Toplam	100,00		
900 W	Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
-8 +4	0,00	100,00	0,00
-4 +2	0,00	100,00	0,00
-2 +1	0,00	100,00	0,00
-1 +0,5	0,00	100,00	0,00
-0,5 +0,3	0,20	100,00	0,20
-0,3 +0,212	1,21	99,80	1,41
-0,212 +0,150	5,03	98,59	6,43
-0,150 +0	93,57	93,57	100,00
Toplam	100,00		

ÜLEKSİT MİNERALİ

Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,20	100,00	0,20
1,40	99,80	1,60
5,10	98,40	6,70
8,70	93,30	15,40
84,60	84,60	100,00
100,00		
Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,31	100,00	0,31
1,25	99,69	1,57
3,55	98,43	5,12
7,63	94,88	12,75
87,25	87,25	100,00
100,00		
Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,33	100,00	0,33
0,66	99,67	0,99
0,99	99,01	1,97
2,85	98,03	4,82
4,16	95,18	8,98
91,02	91,02	100,00
100,00		
Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,36	100,00	0,36
0,48	99,64	0,84
1,33	99,16	2,17
1,57	97,83	3,73
1,45	96,27	5,18
94,82	94,82	100,00
100,00		
Miktar %	T.Elek Altı %	T. Elek Üstü %
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,00	100,00	0,00
0,26	100,00	0,26
0,64	99,74	0,90
1,03	99,10	1,93
0,90	98,07	2,82
97,18	97,18	100,00
100,00		

ÖZGEÇMİŞ

06.08.1970 Tarihinde Aydın'da doğan M. Faruk ESKİBALCI, İlk-Orta ve Lise öğrenimini Aydın-Köşk Lisesinde tamamladıktan sonra 1991 yılında İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünü Kazandı. 1995 yılında Lisans eğitiminden mezun olduktan sonra aynı üniversitenin Fen bilimleri Enstitüsünden 1999 yılında Yüksek Mühendisi unvanını aldı. 1999-2001 tarihleri arasında askerliğini Jandarma Komando Yedek Subay olarak Van ili Çatak İlçe Jandarma Komando Bölüğünde tamamladı. 2001 Yılında Doktora eğitimine başladı. Evli ve bir çocuk babasıdır.